

CAD/CAM/CAE工程应用丛书 ANSYS系列

ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计

主编 孙帮成 李明高 副主编 李明 李国清 孔繁冰 刘斌

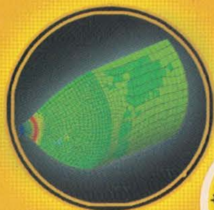
本书核心内容包含

- 计算机流体力学基础
- ANSYS CFD 14.0基础知识
- 排气管道传热系数与辐射计算
- 小汽车空气动力学性能计算
- 室内通风工程问题分析
- 无预混燃烧
- Isight多学科优化设计软件介绍
- 弯管阻力优化
- 高速列车头型气动阻力优化





附赠全书范例素材 DVD 光盘









机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

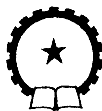
LANZAROTE Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书·ANSYS 系列

ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计

主　编　孙帮成　李明高

副主编　李　明　李国清　孔繁冰　刘　斌



机 械 工 业 出 版 社

本书详细介绍了 ANSYS 14.0 和 ICEM-CFD 软件应用于流体分析领域的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。

本书全面介绍了 ANSYS 14.0 软件流体分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。全书共 9 章，从基本概念及原理开始讲解，逐渐深入到换热分析、流场分析、室内通风问题及优化方法与技术。第 1 章主要介绍了流体力学的基本概念与原理；第 2 章主要介绍了 FLUENT 软件及前处理 ICEM-CFD、后处理 CFD-POST 的基础知识及求解技巧；第 3 章主要介绍了结构网格划分方法、管壁结构换热计算及传热系数的求解方法；第 4 章主要介绍了非结构网格划分方法、运行工况下小汽车的空气动力学性能的设置方法及求解技巧；第 5 章主要介绍了辐射模型种类、太阳加载模型方法及利用 FLUNET 求解工程实践中室内通风问题的分析方法；第 6 章主要介绍了燃烧及化学反应问题；第 7 章主要介绍了 Isight 多学科优化软件的基本功能；第 8 章通过弯管阻力优化实例介绍了 FLUENT 与 Isight 软件、Sculptor 软件联合仿真分析优化方法及单目标优化设计；第 9 章通过高速列车头型气动阻力优化实例介绍了多目标优化设计的方法及技巧。

本书应用 ICEM-CFD 网格划分软件进行了结构化网格和非结构化网格划分方法的讲解，应用 ANSYS FLUENT 14.0 软件对生活、工作中常见的各种流体分析实例进行了计算、分析，重点介绍了 FLUENT 软件与 Isight 多学科优化的联合仿真分析方法及技巧，可为工程研究人员提供优化设计方法指导。

本书可供从事传热、流体流动等学科的教师、工程技术人员与科研人员参考之用，也可用作软件自学教程或参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计/ 孙帮成，李明高主编．—北京：机械工业出版社，2013.12

（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 • ANSYS 系列）

ISBN 978−7−111−44930−0

Ⅰ. ①A⋯ Ⅱ. ①孙⋯ ②李⋯ Ⅲ. ①有限元分析–应用软件 Ⅳ. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 283157 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦
责任编辑：张淑谦
责任印制：李　洋
三河市宏达印刷有限公司印刷
2014 年 1 月第 1 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 22 印张 • 546 千字
0001－4000 册
标准书号：ISBN 978−7−111−44930−0
　　　　　ISBN 978−7−89405−199−8（光盘）
定价：62.00 元（含 IDVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　　网络服务
社服务中心：（010）88361066　　教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：（010）68326294　　机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：（010）88379649　　机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203　　**封面无防伪标均为盗版**

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的《CAD/CAM/CAE 工程应用丛书》。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　言

计算流体力学（CFD）是一种由计算机模拟流体流动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具。CFD 的长处是适应性强、应用面广，目前其广泛应用的领域有：高速铁路、汽车、航空、船舶等行业的空气动力学领域（升力、阻力和倾覆力矩等）和内部流场分析、热管理等；电子和电器行业的电子设备换热分析（如冷板、换热器等的流动及传热计算）；建筑物的内外环境流场及换热分析（如风载荷、通风等）；流体机械的仿真分析（包括泵、风机等）；此外，在化学过程分析、燃烧计算、环境工程、气象分析等方面也有较多应用。

ANSYS 14.0 软件凭借其友好的软件界面、易用的功能模块和高可信度的仿真结果，帮助客户更快速、便捷和低成本地进行流体力学分析，为设计人员开发新产品带来了极大的方便。在 ANSYS 14.0 软件的帮助下，设计者不必费心钻研流体力学微分方程以及计算流体力学，通过软件丰富的网格划分、计算模型、求解方法等功能，即可快速完成评估任务、缩短研发周期、提高设计质量。

本书全面介绍了 ANSYS 14.0 软件流体分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。全书共 9 章，从基本概念及原理开始讲解，逐渐深入到换热分析、流场分析、室内通风问题及优化方法与技术。第 1 章主要介绍流体力学的基本概念与原理；第 2 章主要介绍 FLUENT 软件及前处理 ICEM-CFD、后处理 CFD-POST 的基础知识及求解技巧；第 3 章主要介绍结构网格划分方法、管壁结构换热计算及传热系数的求解方法；第 4 章主要介绍非结构网格划分方法、运行工况下小汽车的空气动力学性能的设置方法及求解技巧；第 5 章主要介绍辐射模型种类、太阳加载模型方法及利用 FLUNET 求解工程实践中室内通风问题的分析方法；第 6 章主要介绍燃烧及化学反应问题；第 7 章主要介绍 Isight 多学科优化软件的基本功能；第 8 章通过弯管阻力优化实例介绍 FLUENT 与 Isight 软件、Sculptor 软件联合仿真分析优化方法及单目标优化设计；第 9 章通过高速列车头型气动阻力优化实例介绍多目标优化设计的方法及技巧。

本书应用 ICEM-CFD 网格划分软件进行了结构化网格和非结构化网格划分方法的讲解，并应用 ANSYS FLUENT 14.0 软件对生活、工作中常见各种流体分析实例进行了计算、分析，重点介绍了 FLUENT 软件与 Isight 多学科优化的联合仿真分析方法及技巧，可为工程研究人员提供优化设计方法指导。

本书主要由孙帮成、李明高、李明、李国清、孔繁冰、刘斌编写。此外，参与编写的还有韩璐、于淼、邵蓉、李欣伟、唐晨、陈倩倩、侯红学等。同时感谢张继业教授、郭迪龙教授、李田副教授和赖宇阳、张伟等在本书编写过程中给予的宝贵建议。由于编者水平有限，书中难免有不妥疏漏之处，欢迎广大读者对本书提出批评和建议，以便做进一步修改和补充。

编者

目　　录

出版说明
前言
第 1 章　计算流体力学基础……1
1.1　流体力学的基本概念……1
1.2　计算流体力学的基本概念……4
1.3　流体运动及换热的基本控制方程……8
1.4　湍流的数值模拟方法……9
1.5　标准 k–ε 模型方程……10
1.6　近壁面处理函数……11
1.7　CFD 求解计算的方法……15
1.8　网格简介……17
1.8.1　结构化网格……17
1.8.2　非结构化网格……18
1.8.3　混合网格……19
1.8.4　网格质量……20
第 2 章　ANSYS CFD 14.0 基础知识……22
2.1　ANSYS FLUENT 14.0 软件概述……22
2.1.1　ANSYS FLUENT 14.0 新功能……22
2.1.2　FLUENT 软件概述……24
2.2　FLUENT 的用户界面……26
2.2.1　启动 FLUENT……26
2.2.2　菜单项……29
2.2.3　项目树……31
2.2.4　鼠标功能……32
2.3　FLUENT 的求解技巧……32
2.3.1　FLUENT 的数值算法……32
2.3.2　FLUENT 的湍流模型……32
2.3.3　FLUENT 的物理模型……34
2.3.4　FLUENT 的边界条件……38
2.3.5　FLUENT 的求解器……46
2.3.6　瞬态 CFD 分析……49
2.3.7　其他应注意的项……51
2.4　CFD-Post 与计算结果后处理……54
2.5　FLUENT 软件在 Workbench 环境中的应用……61

2.6 用户自定义函数（UDF）……62
2.7 前处理软件介绍……64
2.7.1 ICEM CFD 软件基本功能介绍……64
2.7.2 GAMBIT 软件基本功能介绍……66
第 3 章 排气管道传热系数与辐射计算……69
3.1 传热管模型的创建……70
3.2 网格划分……72
3.3 K 值计算设置与处理……81
3.3.1 导入网格文件……81
3.3.2 设置计算模型……84
3.3.3 设置边界条件……85
3.3.4 求解方法的设置与控制……88
3.3.5 计算……91
3.3.6 计算结果统计……92
3.4 辐射计算设置与处理……92
3.4.1 选择辐射模型……93
3.4.2 边界条件的设定……93
3.4.3 设定材料物性参数……93
3.4.4 求解方法的设置……95
3.4.5 计算结果后处理……96
第 4 章 小汽车空气动力学性能计算……101
4.1 实例介绍……101
4.2 模型处理及网格划分……102
4.2.1 导入模型……102
4.2.2 检查模型……105
4.2.3 建立计算域……106
4.2.4 创建流体域的 Body 项……108
4.2.5 创建 Part 项……109
4.2.6 面网格划分……115
4.2.7 网格质量检查……117
4.2.8 输出网格……119
4.3 模型设置……120
4.3.1 导入网格模型……120
4.3.2 设置计算模型……124
4.3.3 设置边界条件……125
4.4 模型求解……129
4.5 后处理……132
4.5.1 FLUENT 自带后处理……132

4.5.2　CFD-Post 后处理……134
第 5 章　室内通风工程问题分析……141
5.1　FLUENT 软件的太阳辐射模型……141
5.1.1　简介……141
5.1.2　太阳射线跟踪算法……141
5.1.3　DO 辐射算法……142
5.2　实例简介……142
5.3　模型前处理……143
5.3.1　导入模型……143
5.3.2　检查模型及修改……145
5.3.3　设置计算域边界……148
5.3.4　创建流体域的 Body 项……151
5.3.5　网格划分……152
5.3.6　网格质量检查……154
5.3.7　输出网格……156
5.4　计算求解……157
5.4.1　导入模型网格……157
5.4.2　物理条件设置……161
5.4.3　边界条件设置……164
5.4.4　求解条件设置……168
5.4.5　太阳辐射计算……169
5.4.6　表面辐射（S2S）计算……172
5.5　计算结果分析……175
5.5.1　室内空气流场分布……177
5.5.2　室内空气温度场分布……179
5.5.3　室内空气流线分布……180
第 6 章　无预混燃烧……183
6.1　无预混燃烧概述……184
6.2　模型设置……184
6.3　模型求解……204
6.4　计算结果后处理……207
第 7 章　Isight 多学科优化设计软件介绍……210
7.1　Isight 软件功能概述……210
7.1.1　概述……210
7.1.2　Isight 软件的主要功能……210
7.1.3　Isight 软件的特点……211
7.1.4　模块构成……212
7.1.5　组件库及组件接口……212

7.2 安装步骤 ……216
7.3 Isight 软件优化工具……221
7.3.1 试验设计（DOE）……222
7.3.2 优化方法（Optimization Method）……225
7.4 优化流程搭建……228
7.4.1 流程建立（Design Gateway）……228
7.4.2 数据流可视化……228
7.4.3 Loop 循环控制……229
7.4.4 Condition 条件控制……230
7.4.5 Parameter 参数控制……230
7.4.6 数据映射（Data Mapping）与数据结构化矩阵（DSM）……232
7.4.7 方案监控（Runtime Gateway）……232
7.4.8 数据管理……234
7.4.9 Isight 组件与流程库管理 Isight Library（Design Gateway）……234
7.4.10 任务数据库 Job Database（Runtime Gateway）……236
第 8 章 弯管阻力优化……238
8.1 优化流程概述……238
8.2 弯管阻力优化应用实例……238
8.2.1 变形软件 Sculptor 对弯管的体网格进行变形……238
8.2.2 ICEM 对网格进行处理……244
8.2.3 流体计算软件 FLUENT 对弯管进行计算……248
8.2.4 Isight 软件对各软件进行集成……256
8.2.5 弯管优化后计算结果的后处理……275
第 9 章 高速列车头型气动阻力优化……282
9.1 多目标优化方法介绍……282
9.1.1 多目标优化理论……282
9.1.2 解的占优关系……283
9.1.3 Pareto 最优解集和 Pareto 前沿……284
9.1.4 多目标优化算法……284
9.2 高速列车头型气动阻力优化应用实例……285
9.2.1 变形软件 Sculptor 对高速列车车头的体网格进行变形……285
9.2.2 ICEM 对网格进行转存……292
9.2.3 流体计算软件 FLUENT 对高速列车进行计算……296
9.2.4 Isight 对各个软件进行集成及 DOE 计算……307
9.2.5 试验设计（DOE）后处理……324
9.2.6 多学科优化计算……331
9.2.7 多学科优化后处理……339



第 1 章　计算流体力学基础

本章主要内容：

本章主要介绍计算流体力学的基本概念与原理，为后文各案例中的网格划分、求解设置和后处理等操作提供初步的理论知识。

本章学习目标：

✧ 流体力学的基本概念。
✧ 计算流体力学的基本概念。
✧ 流体运动及换热的基本控制方程。
✧ 湍流的数值模拟方法。
✧ 标准 k-ε 模型方程。
✧ 近壁面处理函数。
✧ CFD 求解计算的方法。
✧ 网格简介。

1.1　流体力学的基本概念

流体力学是力学的一个分支，它主要研究流体本身的静止状态、运动状态以及流体和固体界壁间相对运动时的相互作用和流动的规律。与固体力学一样，流体力学的研究也经历了很长的发展历史，其中最具有代表意义的事件包括：18 世纪中叶，欧拉采用连续介质的概念，把静流体中压力的概念推广到运动流体中，建立了欧拉方程，正确地用微分方程组描述了无黏流体的运动，因而成为流体力学主要创始人；1845 年，斯托克斯推导出黏性流体的一组基本运动方程，即目前广泛采用的纳维–斯托克斯方程，简称 N–S 方程。N–S 方程是流体力学的理论基础，欧拉方程正是 N–S 方程在黏度为零时的特例。

1．流体的密度和气体状态方程

1753 年，欧拉提出连续介质模型，即采用“连续介质”作为宏观流体模型，将流体看做由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质。也可以理解成，流体质点是指几何尺寸同流动空间相比是极小量，又含有大量分子的微元体。气体与液体均属于流体。

流体的密度定义是单位体积内所含物质的多少，若为均匀介质，则有：

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中　ρ——流体密度，单位为 kg/m^3；

m——流体质量，单位为 kg；

V——流体体积，单位为 m^3。

对于气体，一般由气体状态方程定义：

$$pV = \rho RT \tag{1-2}$$

式中 p——气体压强，单位为 Pa；

V——气体体积，单位为 m^3；

ρ——气体密度，单位为 kg/m^3；

R——气体常数，空气的 R 值为 287J/(kg·K)；

T——气体热力学温度，单位为 K。

2．流体的黏性

流体的黏性是指在做相对运动的两流体层的接触面或流体与固体的接触面上，存在一对等值且反向的力阻碍流体运动的现象。其产生的原因是由于存在分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力。由黏性产生的作用力即黏性阻力，又称内摩擦力。牛顿内摩擦定律定义的两层流体间切应力的表达式为：

$$\tau = \mu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{1-3}$$

式中 τ——切应力，单位为 N；

μ——动力黏性系数，与流体物性和温度有关，单位为 kg/(m·s)；

$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$——垂直于两层流体接触面上的速度梯度，单位为 s^{-1}。

黏性系数受温度的影响很大，当温度降低时，液体的黏性系数增大，黏性增强；而气体的黏性系数和黏性则均降低。在压强不是很高的情况下，黏性系数受压强的影响较小。

3．流体的导热性

流体的导热性是指当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时，温度较高区域与温度较低区域之间存在热量传递的现象。

热量传递有导热、对流和热辐射 3 种方式。流体流过壁面时，紧贴壁面的位置会形成层流底层，流体在该处流速很低，几乎可看做为零，故此处流体与壁面进行的是导热过程；层流之外的区域热传递方式主要是对流传热过程。

（1）导热

单位时间内通过某一给定面积的热量称为面积热流量。当物体的温度仅在 x 方向发生变化时，按照傅里叶定律（又称导热基本定律），面积热流量的表达式为

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x} \tag{1-4}$$

式中 q——面积热流量，单位为 W/m^2；

Φ——总热流量，单位为 W；

A——换热面积，单位为 m^2；

λ——热导率，单位为 W/(m·K)；

$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x}$——沿 x 方向的温度梯度，单位为 K/m，x 为面积的法线方向。

负号“−”表示热量传递方向与温度梯度方向相反。

（2）对流

通常情况下，流体与固体表面间的对流面积热量可用下式表达：

$$q = h(T_1 - T_2) \tag{1-5}$$

式中 q——面积热流量，单位为 W/m^2；

h——表面传热系数，单位为 W/(m^2·K)；

$T_1 - T_2$——流体与固体的温度差，单位为 K。

（3）热辐射

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体。实际物体辐射热流量的计算总可以采用斯忒潘–波尔兹曼定律的经验修正公式：

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \tag{1-6}$$

式中 Φ——总换热量，单位为 W；

ε_1——物体 1 的发射率（又称黑度），其值总小于 1；

A_1——物体 1 的辐射面积，单位为 m^2；

σ——斯忒潘–波耳兹曼常量（又称黑体辐射常数），是个自然常数，σ=5.67×10^{-8}，单位为 W/(m^2·K^4)；

T_1、T_2——物体 1 和物体 2 的热力学温度，单位为 K。

4．可压流体与不可压流体

根据密度ρ是否为常数，可将流体分为可压流体与不可压流体两大类。当密度ρ为常数时，流体为不可压流体。一般水可看做不可压流体，空气为可压流体。有些可压流体在特定的流动条件下，可按不可压流体处理。

不可压流体的压力场是通过连续方程间接描述的，由于没有直接求解压力的方程，不可压流体的流动方程的求解尤为困难。

在可压流体的连续方程中含密度ρ，因而把密度ρ视为连续方程中的独立变量进行求解，再根据气体的状态方程求出压力。

5．层流流动与湍流流动

对于管内流动，科学家根据大量实验数据与相似理论得出，流动状态是由综合反映管道尺寸、流体物理属性、流动速度的组合量——雷诺数 Re 来决定的。雷诺数 Re 定义为：

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \tag{1-7}$$

式中 ρ——流体密度，单位为 kg/m^3；

u——平均流速，单位为 m/s；

d——管道直径，单位为 m；

μ——动力黏性系数，单位为 kg/(m·s)。

区分层流流动与湍流流动涉及临界雷诺数的概念。其中，由层流转变为湍流时所对应的雷诺数称为上临界雷诺数，用 $Re_{cr}^{'}$ 表示；由湍流转变为层流时所对应的雷诺数称为下临界雷诺数，用 Re_{cr} 表示。通过比较实际流动的雷诺数 Re 与两个临界雷诺数，即可确定黏性流体的流动状态。比较准则如下所示：

- 当 $Re < Re_{cr}$ 时，流动为层流状态。
- 当 $Re > Re_{cr}^{'}$ 时，流动为湍流状态。

- 当 $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$ 时，流动可能为层流状态，也可能为湍流状态。一般称之为过渡状态。

在工程应用中，一般统一取临界雷诺数 Re_{cr}=2300，当 Re<2300 时，流动为层流流动；而当 Re>2300 时，可认为流动为湍流流动。

不同雷诺数绕圆柱的流动效果如表 1-1 所示。

表 1-1　不同雷诺数绕圆柱的流动效果

雷诺数的取值范围	绕圆柱的流动效果	备　　注
$Re < 5$		蠕动流（无分离）
$5\sim15 < Re < 40$		尾迹区有一对稳定涡
$40 < Re < 150$		层流涡街
$150 < Re < 3\times10^5$		分离点前为层流边界层，尾迹为湍流
$3\times10^5 < Re < 3.5\times10^6$		边界层转捩为湍流
$Re > 3.5\times10^6$		湍流涡街，但涡间距离更近

6．定常流与非定常流

根据流体流动的物理量（如速度、压力、温度等）是否随时间变化，可将流动分为定常流与非定常流两大类。当物理量不随时间变化，即 $\frac{\partial(\ )}{\partial t}=0$ 时，流动为定常流动；当流动的物理量随时间变化，即 $\frac{\partial(\ )}{\partial t}\neq 0$ 时，流动为非定常流动。定常流动也称为恒定流动或稳态流动；非定常流动也称为非恒定流动、非稳态流动或瞬态流动。

1.2　计算流体力学的基本概念

计算流体力学（CFD）是一种由计算机模拟流体流动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具。CFD 的长处是适应性强、应用面广，目前已广泛涵盖了高速铁路行业、汽车和航空业的空气动力学领域（升力、阻力和倾覆力矩等）以及内部流场分析、热管理等；电子和电器行业的电子设备换热分析（如冷板、换热器等的流动及传热计算）；建筑物的内外环境流场及换热分析（如风载荷、通风等）；流体机械的仿真分析（包括泵、风机等）；此外，在化学过程分析、环境工程、气象分析等方面也有较多应用。

CFD 分析一般应用在产品的概念设计、详细设计和改进设计等阶段。CFD 的基本思想

是：把原来在时间域和空间域上连续的物理量场，用一系列离散点上的变量值的集合来代替，并通过一定的原则和方式建立起反映这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似解。



1．CFD 计算流程

CFD 计算主要包括前处理、求解和后处理三部分。

（1）前处理

在 CFD 计算中，前处理一般要占一半以上的计算时间，主要用于模型修整、面网格生成、体网格生成和计算域、边界条件的设定等。前处理阶段用户需要进行的工作包括：

1）定义所求问题的几何计算域。

2）将计算域划分为多个互不重叠的子区域，形成由单元组成的网格。

3）对所要研究的物理或化学现象进行抽象，选择相应的控制方程。

4）定义流体的属性参数。

5）为计算域边界处的单元指定边界条件。

6）对于瞬态问题，指定初始条件。

（2）求解

目前各 CFD 软件采用的求解方法均按如下步骤运行：采用简单函数来近似表示未知的流动变量；将近似函数代入流动控制方程和所得到的数学式进行离散化；求解代数方程。其差别主要在于流动变量的近似方法和离散化过程的不同。

目前在流动和传热问题中最有效的数值计算方法是有限体积法，该方法又称为控制体积法，是一项经过校核且发展很好的通用 CFD 技术，多数 CFD 软件（如 STAR−CCM+、FLUENT、CFX、PHOENICS）都采用此方法为核心算法。其基本思想为：将计算区域划分为网格，并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积；将待解的偏微分方程对每一个控制体积积分，从而得出一组离散方程，其中的未知量是网格点上的特征变量。为求出控制体积的积分，必须假定特征变量值在网格点之间的变化规律。从积分区域的选取方法来看，有限体积法属于加权余量法中的子域法；从未知解的近似方法来看，有限体积法属于采用局部近似的离散方法。简而言之，有限体积法的基本思想就是子域法加上离散。

有限体积法主要包括以下求解步骤：

1）在计算域的所有控制容积内对流动控制方程进行积分。

2）离散化网格，将积分方程中的对流项、扩散项和源项用有限差分公式来近似表示，将积分方程转变为代数方程组。

3）迭代求解该代数方程组。

（3）后处理

由于计算机技术的不断进步，CFD 软件提供的数据可视化技术和工具越来越多，如计算域和网格显示；等值线图（云图，包括压力云图、温度云图、速度云图等）；矢量图（如速度矢量图）；视角变换（平移、缩放、旋转）；颗粒追踪；动画输出等。

2．离散化

离散化是指将求解区域的空间分割为网格，以网格上的离散的值来近似空间上连续的值。每一个解析网格即一个控制体，如图 1−1 所示。

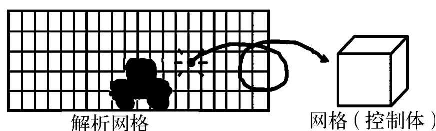


图 1−1　控制体

离散化一般的实施过程是：把所计算的区域划分成许多个互补重叠的子区域，确定每个子区域中的节点位置及该节点所代表的控制体积。区域离散化过程结束后，可以得到以下 4 种几何要素：

1）节点，即需要求解的未知物理量的几何位置。

2）控制容积，即应用控制方程或守恒定律的最小几何单位。

3）界面，它规定了与各节点相对应的控制容积的分界面位置。

4）网格线，即沿坐标轴方向联结相邻两节点而形成的曲线族。

计算时，从边界条件处获得物理量的值，在相邻网格之间有着质量、动量和能量的传递。随着计算的推进，得到全部网格上流速、压力和密度等物理量的值，如图 1−2 所示。

以网格上离散的值构建差分方程的方法称为差分格式，离散网格上的差分方程是连续空间上的微分方程的近似。使用不同的差分格式，计算的精度、稳定性都有变化。

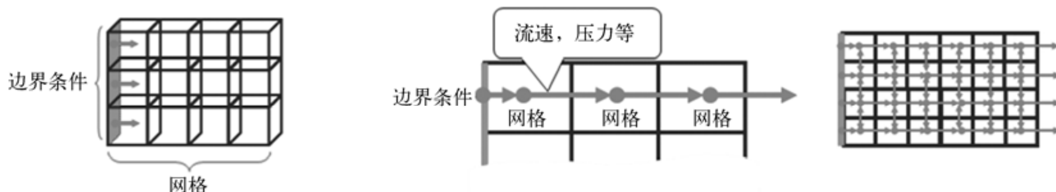


图 1−2　离散化的原理

理想的离散格式要求既具有稳定性，又具有较高精度，同时还能适应不同的流动形式。但实际上这种离散格式很难实现。表 1−2 列出了几种常用离散格式的性能对比。

表 1−2　常用离散格式的性能对比

离 散 格 式	稳定性及条件	精度与经济性
中心差分	条件稳定 Pe≤2	在不发生振荡的前提下，可获得较准确的计算结果
一阶迎风	绝对稳定	当 Pe 较大时，假扩散严重。为避免此问题，需要加密网格
混合格式	绝对稳定	当 Pe≤2 时，性能同中心差分；当 Pe>2 时，性能同一阶迎风
指数格式	绝对稳定	精度高，主要适用于无源项的对流扩散问题
乘方格式	绝对稳定	性能同指数格式，但比指数格式省时
二阶迎风	绝对稳定	比一阶迎风精度高，仍有假扩散问题
QUICK	条件稳定 Pe≤8/3	可减少假扩散误差，精度较高，应用广泛，主要用于四边形或六面体网格
改进的 QUICK	绝对稳定	性能同 QUICK 格式，不存在稳定性问题

注：1. Pe 数表征某点处的对流和扩散的强度比例。
2. 假扩散现象是由于对流——扩散方程中一阶导数项的离散格式的截断误差小于二阶而引起较大数值计算误差的现象。

在表 1−2 的基础上，可总结出以下规律：

1）在满足稳定性条件的前提下，一般截断误差阶数较高的格式具有较高的计算精度。

如具有三阶截断误差的 QUICK 格式，通常可以获得较高的计算精度。在选用低阶截断误差格式时，注意应将网格划分得足够密，以减少假扩散影响。

2）稳定性与精确性常常互相矛盾。精确度较高的格式，如 QUICK 格式等，都不是无条件稳定，而假扩散现象相对严重的一阶迎风格式则是无条件稳定。其中的一个原因是，为提高离散格式的截断误差等级，通常需要从所研究的节点两侧取用一些节点来构造该节点上的导数计算式，而当导数计算式中出现下游节点且其系数为正时，迁移特性遭到破坏，因此格式只能是条件稳定。

3）一阶和二阶差分格式均可应用于二维和三维问题。

3．计算流体力学的研究方法

CFD 解析方法采用数值方程式表示实际流体。为使其简化，往往采用位势流理论、边界层近似、完全气体近似等，进而导入相应的湍流数学模型并进行数值计算。由于计算是基于对实际流体的近似进行，故应考虑计算前提近似的影响，根据计算结果的精确度、可信性、计算机条件和计算经验等确定合适的数值解法。然后编写程序代码，利用计算机进行求解计算和后处理。

数值计算方法的实质是把描述空气运动的连续介质数学模型离散成大型代数方程组，建立可在计算机上求解的算法。通过偏微分方程的离散化和代数化，将无限信息系统变为有限信息系统（离散化），把偏微分方程变为代数方程（代数化），再通过采用适当的数值计算方法，求解方程组，得到流场的数值解。离散的实质解通常以两种形式给出：网格上的近似值，如差分法；单元中易于计算的近似表达式，如有限元、边界元等。

CFD 是建立在全 Navier−Strokes 方程(简称 N−S 方程) 近似解基础上的计算技术。根据近似解的精度等级，把 N−S 方程的解法分为以下 4 类：

1）线性非黏性流方法。

2）非线性非黏性流方法。

3）平均雷诺数基础上的 N−S 方程解法。

4）全 N−S 方程解法。

CFD 数值计算方法主要包括有限差分法（FDM）、有限元法（FEM）、边界体积法（BIM）等。其中，有限差分法包括有限体积法（FVM）、流线曲率法（SCM）、质量网格法（PIC）、流体网格法（FLIC）等，这些方法均为有限差分法的一种或其变形的一种方法。三种方法的比较如表 1−3 所示。

表 1−3 三种 CFD 数值计算方法的比较

比较项	有限差分法	有限元法	边界体积法
网格分割	规则的格子普遍用于边界的网格分割	可自由分割为三角形、四边形、三棱柱、六面体等网格	边界的面元分割
建立一次方程式的系数行列	大型、带成分不密集的行列	大型、带成分不密集的行列	小型、成分密集的行列
主要特征	最基本的标准解法	精确度高，对已有程序使用方便，计算量大	输入数据少
适用性	适用性广，用于伴有冲击波的超声速流边界层流，LES 计算	适用于复杂形状的边界	定常流中的流体自由表面流

由于有限体积法应用较为广泛，也有人将 CFD 数值计算方法分为有限差分法、有限元法、有限体积法 3 类。

流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况如表 1-4 所示。

表 1-4　流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况

假　设	导 出 方 程	CFD 方法
无粘流	欧拉方程	欧拉法
无旋流	拉普拉斯方程	涡格法 边界层法 面元法
时均流	雷诺方程	k-Epsilon 模型 低雷诺数 k-Epsilon 模型 各向同性 k-Epsilon 模型 雷诺应力模型
空间平均		大涡模型
无处理		直接模型

1.3　流体运动及换热的基本控制方程

散热器内的空气流动、小汽车和高速动车组外流场的空气流动特性，其实质均是流体流动与换热问题。流体运动是最复杂的物理行为之一，与结构设计领域中应力分析等问题相比，其建模与数值模拟要困难得多。然而，对任何复杂的湍流流动，N-S 方程都是适用的。流体运动及换热的控制方程如下所示。

连续方程的表达式为：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1-8}$$

式中，ρ 为流体的密度，u_i 为流体速度沿 i 方向的分量。连续方程又称为质量守恒方程。

动量守恒方程的表达式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i \tag{1-9}$$

式中，p 是静压力，τ_{ij} 是应力矢量，ρg_i 是 i 方向的重力分量，F_i 是由于阻力和能源而引起的其他能源项。

能量守恒方程表达式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h)=\frac{\partial}{\partial x_i}(k+k_t)\frac{\partial T}{\partial x_i}+S_h \tag{1-10}$$

式中，h 是熵，k 是分子传导率，k_t 是由于湍流传递而引起的传导率，S_h 是定义的体积源。

由以上的质量守恒、动量守恒及能量守恒方程可知，共有 u、v、w、p、T、ρ 六个未知量，为了使方程封闭，还需要补充一个联系 p 和 ρ 的状态方程（1-2），方程组才能封闭。

流体的宏观性质，如扩散、黏性和热传导等，是分子输运性质的统计平均。由于分子的不规则运动，在各层流体间交换着质量、动量和能量，使不同流体层内的平均物理量均匀化。这种性质称为分子运动的输运性质。结合前述流体力学的基本概念，质量输运在宏观上

表现为扩散现象，动量输运表现为黏性现象，能量输运表现为热传导现象。

对于所有的流动，FLUENT 都是解质量和动量守恒的方程。对于包括热传导或可压性的流动，需要解能量守恒的附加方程。对于包括组分混合和反应的流动，需要解组分守恒方程或者使用 PDF 模型来解混合分数的守恒方程以及其方差。当流动是湍流时，还要解附加的输运方程。



1.4 湍流的数值模拟方法

层流和湍流是流体运动的两种基本形式。1883 年，雷诺揭示了黏性流动这两种不同本质的流动形态。自此，世界各国学者对湍流进行了持续研究，取得不少进展，解决了很多工程领域的难题。但由于湍流运动极其复杂，其基本机理至今未能完全掌握，而且不能准确地定义并定量地给出湍流的运动特性。目前，一般将湍流的主要特征归结为随机性、扩散性、有涡性和耗散性。

湍流出现在速度变动的地方，这种波动引起流体介质之间动量、能量和浓度的变化，而且引起了数量的波动。因此，湍流是一种高度复杂的三维非稳态、带旋转的不规则流动。在湍流中流体的各种物理参数，如速度、压力、温度等都随时间与空间发生随机的变化。从物理结构上说，可以把湍流看成是由各种不同尺寸的涡旋叠合而成的流动，这些涡旋的大小及旋转轴的方向分布是随机的。大尺度的涡旋主要由流动的边界条件决定，其尺寸可与流场的大小相比拟，是引起低频脉动的原因；小尺度的涡旋主要由黏性力决定，其尺寸可能只有流场尺度的千分之一的量级，是引起高频脉动的原因。大尺度的涡旋破裂后形成小尺度的涡旋。较小尺度的涡旋破裂后形成更小尺度的涡旋。因而在充分发展的紊流区域内，流体涡旋的尺寸可在相当宽的范围内连续地变化。大尺度的涡旋不断地从主流获得能量，通过涡旋间的相互作用，能量逐渐向小尺度的涡旋传递。最后由于流体黏性的作用，小尺度的涡旋不断消失，机械能就转化（或称耗散）为流体的热能。同时，由于边界的作用、扰动及速度梯度的作用，新的涡旋又不断产生，这就构成了湍流运动。由于湍流是小尺度、高频率的，所以在实际工程计算中直接模拟的话对计算机的要求会很高。实际上瞬时控制方程可能在时间上、空间上是均匀的，或者可以人为地改变尺度，这样修改后的方程耗费较少的计算机资源。但是，修改后的方程可能包含有人们不清楚的变量，湍流模型需要用已知变量来确定这些变量，目前能够用于工程计算的湍流数值计算方法是雷诺平均方法，即只计算大尺度平均流动，所有湍流脉动对平均流动的作用，用湍流模式理论加以封闭，使计算量大为减少。

湍流的数值模拟方法主要有以下 3 种：

（1）直接模拟法（Direct Numerical Simulation，DNS）

直接模拟法是用三维非稳态的 N-S 方程对湍流进行直接数值计算的方法。要对高度复杂的湍流运动进行直接的数值计算，必须采用很小的时间与空间步长，才能分辨出湍流中详细的空间结构及变化剧烈的时间特性。直接模拟法的最大好处是无需对湍流流动做任何简化或近似，理论上可得到相对准确的计算结果。但湍流的直接模拟法对内存空间及计算速度的要求非常高，目前还无法用于真正意义上的工程数值计算，但大量的探索性工作正在进行之中。

（2）大涡模拟法（Large Eddy Simulation，LES）

湍流流动的仿真计算，需要计算域的尺寸应大到足以包含湍流运动中出现的最大涡。同时计算网格的尺度应小到足以分辨最小涡的运动。按照湍流的涡旋学说，湍流的脉动与混合主要是由大尺度的涡造成的。大尺度的涡从主流中获得能量，它们是高度的非各向同性，而且随流动的情形而异。大尺度的涡通过相互作用把能量传递给小尺度的涡。小尺度涡的主要作用是耗散能量，它们几乎是各向同性的，而且不同流动中的小尺度涡有许多共性。大涡模拟法就是用非稳态的 N−S 方程来直接模拟大尺度涡，但不直接计算小尺度涡，小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑，即在涡黏性的基础上，把湍流脉动所造成的影响用一个湍流黏性系数，即涡黏性来描述。大涡模拟法对计算机内存及速度的要求也比较高，但远低于直接模拟法对计算机资源的要求。

（3）雷诺时均方程法（Reynolds−Averaged Navier-Stokes，RANS）

N−S 方程的非线性使得用解析的方法很难精确描写三维时间相关的全部细节，这对于解决实际问题意义不大。应用雷诺时均方程法是目前工程湍流计算中所采用的基本方法，其做法是将非稳态控制方程对时间作平均，在所得出的关于时均物理量的控制方程中包含了脉动量乘积的时均值等未知量，于是所得方程的个数就小于未知量的个数，而且不可能依靠进一步的时均处理而使控制方程封闭。要使方程组封闭，必须做出假设，建立模型。这种模型把未知的更高阶的时间平均值表示成较低阶的计算中可以确定的量函数。Spalart−Allmaras 模型，k–ε 模型等 k–ω 模型均属于应用雷诺时均方程法。

应用雷诺时均方程法又分雷诺应力方程法和湍流黏性系数法两大类。雷诺应力方程法对于在时均过程中引入的两个脉动值乘积的时均项再建立偏微分方程。在建立两个脉动值乘积的时均值的方程的过程中，又会引入 3 个脉动值乘积的时均值，为使方程组封闭，对 3 个脉动值乘积的时均值建立微分方程。而在这一过程中，又出现了 4 个脉动速度乘积的时均值，这在理论上是一个不封闭性的困难。我国著名科学家周培源教授在 20 世纪 40 年代，在 4 个脉动速度乘积这一层次上，加上了一个涡量脉动平方平均值的方程式，使雷诺应力方程封闭，即 17 方程模型，其中包括了两个速度脉动值时均值的方程和 3 个速度脉动值乘积时均值的方程。随着计算机技术的飞速发展，雷诺应力方程模型在湍流数值计算中的应用日益广泛，特别是其中对二阶矩建立微分方程，对三阶矩引入近似处理的方法已经应用到工程数值计算中。湍流动力黏度法又称湍流黏性系数法，是目前工程流动与数值计算中应用最广的方法。但由于目前的湍流模型基本上都是基于低速不可压缩模式发展的，工程中一般选用广为应用的标准 k−ε 模型。

1.5　标准 k–ε 模型方程

湍流流动是非常复杂的流动，计算湍流运动时，需要附加湍流方程。模型方程的选取要视具体情况而定，在此以 $k-\varepsilon$ 双方程模型为例。本节所给出的 k−ε 模型方程是针对湍流发展非常充分的湍流流动而建立的。它适用于高 Re 数的湍流计算模型。

标准 k–ε 模型是半经验公式，主要是基于湍流动能和扩散率。湍流动能方程——k 方程是个精确方程，而湍流耗散率方程——ε 方程是个由经验公式导出的方程。如不考虑用户自

定义的源项时，标准 k–ε 模型方程如式（1–11）和式（1–12）所示。

湍动动能 k 方程

$$\rho\frac{Dk}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu_l+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon \tag{1–11}$$

湍动能耗散率 ε 方程

$$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{1–12}$$

式中 μ_l——层流黏性系数；

μ_{t}——湍流黏性系数。

$$\mu_{\mathrm{t}}=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1–13}$$

式中 G_k——由层流速度梯度而产生的湍流动能；

G_b——由浮力产生的湍流动能；

$C_{1\varepsilon}$，$C_{2\varepsilon}$，$C_{3\varepsilon}$，σ_k 和 σ_ε——经验常数；

C_μ——湍流常数。

有效的黏性系数

$$\mu=\mu_t+\mu_l \tag{1–14}$$

k–ε 模型假定流场完全是湍流，分子之间的黏性可以忽略。因而标准 k–ε 模型只对完全湍流的流场有效。

模型常量是从空气、水的基本湍流试验中得来的，FLUENT 软件一般取值为：

$$C_{1\varepsilon}=1.44,\ C_{2\varepsilon}=1.92,\ C_\mu=0.09,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.3$$

以上方程组是非线性二阶偏微分方程组，对大多数工程问题，无法获得精确解析解，只能用 CFD 数值模拟的方法求解。数值方法的实质是离散化和代数化。数值计算就是将描述物理现象的偏微分方程在一定的网格系统内离散，用网格节点处的场变量值近似描述微分方程中各项所表示的数学关系，按一定的数学原理构造与微分方程相关的离散代数方程组，引入边界条件后求解离散代数方程组，得到各网格节点处的场变量分布，用这一离散的场变量分布近似代替原微分方程的解析解。

将标准 k–ε 模型用于强旋流或带有弯曲壁面的流动时，会出现一定失真。针对这种问题，后来发展的 RNG k–ε 模型通过修正湍流黏性系数，考虑了平均流动中的旋转及旋转流动情况，且在 ε 方程中增加了一项反应主流的时均应变率，与流动相关保持相关，也在同一问题中保证了还是空间坐标的函数。另外，Realizable k–ε 模型也在湍流黏性系数计算公式上引入了旋转和曲率的影响因素，在 k 方程中不再包含 G_k 项，以更好地模拟各种类型的能量传递。因此，Realizable k–ε 模型能更好地解决旋转均匀剪切流、管内流动、边界层流动和带有分离的流动等。

1.6 近壁面处理函数

湍流流动受壁面影响很大，很明显平均流动区域将由于壁面不光滑而受到影响。当然，

湍流还受到壁面产生的其他影响。在离壁面很近的地方，黏性力将抑制流体切线方向速度的变化，而且流体运动受壁面阻碍，从而抑制了正常的波动。

在近壁面的外部区域，湍流动能受平均流速的影响而增大，湍流运动加剧。LES 模型仅适用于湍流核心区域（一般都远离壁面），应该考虑怎样使这些模型适用于壁面边界层处的流动。如果近壁面的网格划分足够好，Spalart–Allmaras 和 k–ω模型可以解决边界层的流动。

前面介绍的$k-\varepsilon$模型均为针对充分发展的湍流、高 Re 数的湍流模型。但对于近壁区的流动，Re 数较低，湍流发展并不充分，湍流的脉动影响不如分子黏性的影响大。要对近壁区内的流动进行模拟计算，则必须对前面所述的$k-\varepsilon$方程进行修正。壁面函数法和低 Re 数$k-\varepsilon$模型均可有效解决近壁区及低 Re 数情况下的流动计算问题。

在无滑移壁面附近，存在很强的变量梯度。此时，黏性效应对运输过程有很大影响，在数值模拟过程中就需考虑壁面的黏性效应和边界层内快速变化的变量的求解这两大问题。

实验研究表明，对于在固体壁面上充分发展的湍流流动，沿壁面法线方向可将流动区域划分为壁面区和核心区。核心区的流动可以认为是完全湍流区。壁面区又可分为黏性底层、过渡层和对数律层。

黏性底层在最里层，又叫黏性力层，流动区域很薄，在这个区域里，黏性力在动量、热量及质量交换中都起主导作用，湍流切应力可以忽略，因此流动几乎是层流流动，平行于壁面的速度分量沿壁面法线方向呈线性分布。

过渡层处于黏性底层的外面，其中黏性力与湍流切应力作用相当，流动状况比较复杂，很难用一个公式或定律来表述。由于过渡层的厚度极小，故计算中将其归入对数律层。

对数律层处于最外层，其中黏性力的影响不明显，湍流切应力占主导地位，流动处于充分发展的湍流状态，流速分布接近对数关系。

为建立壁面函数，现引入两个无量纲参数 u^+和 y^+，分别表示速度和距离，即

$$u^+=\frac{u}{u_\tau} \tag{1-15}$$

$$y^+=\frac{\Delta y\rho u_\tau}{\mu}=\sqrt{\frac{\tau_{\rm w}}{\rho}} \tag{1-16}$$

式中 u——流体的时均速度；

u_τ——壁面摩擦速度，$u_\tau=\sqrt{\frac{\tau_{\rm w}}{\rho}}$；

$\tau_{\rm w}$——壁面切应力；

Δy——到壁面的距离。

大量试验表明，近壁面区域可以分成 3 层区域，如图 1–3 所示，以 $\ln y^+$为横坐标，u^+为纵坐标，将壁面区内划分为 3 个子层及核心区内的流动。图 1–3 中的小三角形及小空心圆代表在两种 Re 数下实测得到的速度值 u^+，直线代表对速度进行拟合后的结果。

根据普朗特的边界层理论，黏性较小的流体绕流物体时，黏性的影响仅限于贴近物面的薄层内，而在这薄层之外可以忽略。在这个薄层内，形成一个从固体壁面速度为零到外流速度的速度梯度区，这一薄层即边界层。

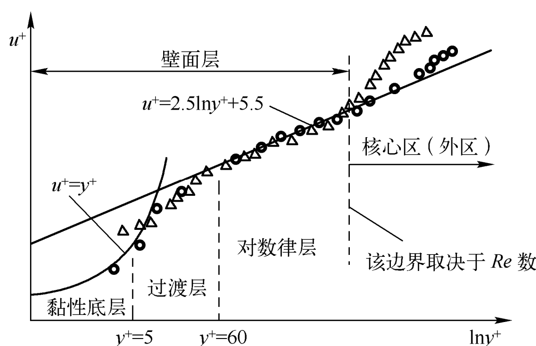


图 1−3 壁面区 3 个子层的划分与相应的速度

合适的边界层网格分布是用好湍流模型的关键因素之一。边界层网格质量的控制可通过控制 y^+ 值范围来实现，一般对于壁面函数法，要求 $20<y^+<100$；对低雷诺数模型，要求 $y^+<2$。根据要控制的 y^+ 值范围，可确定边界层内网格节点和壁面间的最小距离 Δy，按式（1−17）确定。

$$\Delta y=\frac{\sqrt{80}Ly^+}{Re_L^{13/14}} \tag{1−17}$$

式中 L——特征长度，单位为 m；

Re——特征长度处对应的雷诺数。

假设近壁面的速度分布符合对数函数，我们可以在边界层内计算得出流体的剪切应力。该函数即壁面函数。通常，近壁面区域流动分析有两种方法：壁面函数法和低 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型法。

（1）壁面函数法

壁面函数法不对黏性影响比较明显的区域（黏性底层和过渡层）进行求解，而是用一组半经验公式（即壁面函数）将壁面上的物理量与湍流核心区内的相应物理量联系起来。采用壁面函数法的半经验公式可解决壁面对流动的影响，对受黏性力影响的区域（黏性底层和过渡层），其壁面方程的运用能够很好地修正湍流模型。对于大多数高雷诺数的流动，壁面函数法能充分节省计算资源，因为在近壁面黏性力影响区域，由于变量变化太快，不需要解决，这种方法经济，实用而且很精确，很受欢迎。

壁面函数法的基本思想为：对于湍流核心区的流动采用 $k-\varepsilon$ 模型求解，而不求解壁面区，换为直接采用半经验公式将壁面上的物理量与湍流核心区内的求解变量联系起来，这样不经过对壁面区内的流动进行求解，就可以直接得到与壁面相邻控制容积的节点变量值。

在划分网格时，壁面函数法不需要加密壁面区，只需要将第一个内节点布置在对数律成立的区域内，即放置到湍流充分发展区域，如图 1−4a 所示。图中阴影部分为壁面函数公式有效的区域，在阴影以外的网格区域则为采用高 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型进行求解的区域。壁面函数如同一架桥梁，将壁面值同相邻控制容积的节点变量值联系起来。

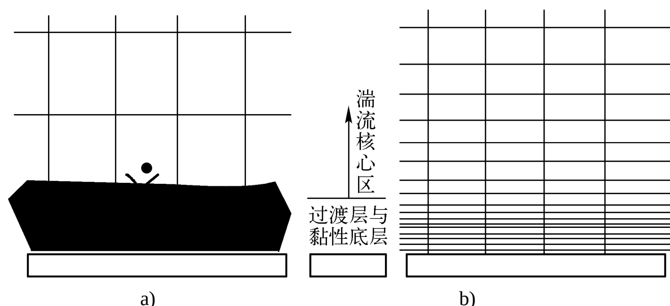


图 1-4 求解壁面区流动的两种方法所对应的计算网格

a) 壁面函数法对应的计算网格 b) 低 *Re* 数 k-ε模型对应的计算网格

用壁面函数来表示边界层的速度、温度、湍流能量等物理量的分布。在边界层区域，流体的湍流效应十分显著，高雷诺数模型在此区域内就不再适用了，有时为了减少在壁面附近网格的数量，又不得不采用高雷诺数 k-ε 模型，故采用壁面函数法来计算壁面处的湍流物理量。对于大多数高雷诺数的流动，壁面方程法能充分节省计算资源，因为在近壁面黏性力影响区域，由于变量的变化太快，不需要解决，这种方法经济，实用而且很精确，很受欢迎，对于这种工业上的流动模拟，这是一个很好的方法。然而壁面方程法运用在低雷诺数流动区域却并不理想，其所依赖的壁面方程的假设不再成立，在这种情况下，需要用“近壁面模型”来解决黏性力影响区域的流动。

（2）低 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型法

壁面函数法的表达式主要根据简单平板流动边界层的试验资料归纳获得，并未对壁面区内部尤其是黏性底层内的流动进行细致研究，分子的黏性作用没有得到充分考虑。为了能够让基于 $k-\varepsilon$ 模型的数值计算能从高 Re 数区域一直延伸到固体壁面上（该处 Re 数为零），有学者提出低 Re 数的流动主要体现在黏性底层中，流体的分子黏性起着绝对重要的作用，因此必须对高 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型进行以下三方面的修正，才能使其可用于计算各种 Re 数区域的流动。

1）为体现分子黏性的影响，控制方程的扩散系数项必须同时包括湍流扩散系数与分子扩散系数两部分。

2）控制方程的有关系数必须考虑不同流态的影响，即在系数计算公式中引入湍流雷诺数 Re_t。

$$Re_t = \frac{\rho k^2}{\eta \varepsilon} \tag{1-18}$$

3）在 k 方程中考虑壁面附近湍动能的耗散不是各向同性这一因素。

对于壁面边界，通常指定壁面处流体的切向速度 u_w 为零，即壁面无滑移边界条件；与壁面垂直的速度 v，由于在壁面附近 $\partial u / \partial x \cong 0$，根据连续性方程，$\partial v / \partial y \cong 0$。对于无黏性流动，流体在壁面处无剪切运动，即壁面为滑移边界条件，此处控制体界面上的剪切动量通量和温度梯度为零。

在固体壁面的黏性底层中，流动与换热的计算可以采用低雷诺数 k-ε 模型或壁面函数法。采用低雷诺数 k-ε 模型时，要在黏性底层中布置比较多的节点。采用高雷诺数 k-ε 模

型，在黏性底层内不布置任何节点，把与壁面相邻的第一个节点布置在旺盛湍流区域内。

有文献指出，当局部湍流的 Re_t 数小于 150 时，应使用低 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型法，而非高 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型法。

1.7 CFD 求解计算的方法

流场计算求解的本质是对离散方程组的求解。离散方程组的求解方法包括耦合求解法和分离求解法两种，具体如图 1-5 所示。

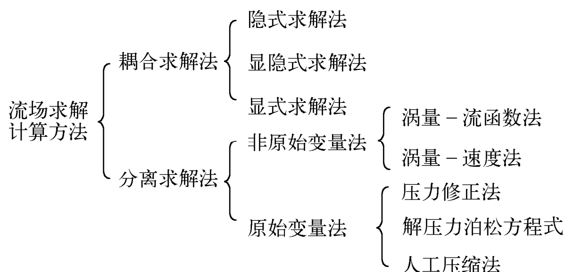


图 1-5 离散方程组的求解方法

1．耦合求解法

耦合求解法最大的特点为联立求解离散方程组以获得各变量值（u、v、w、p），具体求解过程如下：

1）假定初始压力和速度，确定离散方程的系数和常数项。

2）联立求解连续方程、动量方程、能量方程。

3）求解湍流方程及其他方程。

4）判断当前时间步上的计算是否收敛。如不收敛，返回至第二步，进行迭代计算；如收敛，重复以上步骤，计算下一时间步的各物理量值。

耦合求解法可分为隐式求解法（所有变量整场联立求解）、显隐式求解法（部分变量整场联立求解）和显式求解法（在局部地区，如某个单元，对所有变量联立求解）。对于显式求解法，在求解某个单元时，通常要求相邻单元的物理量值已知。

耦合求解法计算效率低，内存消耗大。当流体的密度、能量、动量存在相互依赖关系时，采用耦合求解法具有较大优势，适于高速可压流动等。耦合求解法中，隐式求解法应用较为普遍，而显式求解法仅用于动态性极强的场合，如激波捕捉等。

2．分离求解法

分离求解法不直接求解联立方程组，而是按照顺序逐个求解各变量的离散方程组。根据是否直接求解原始变量（u、v、w、p），又可分为非原始变量法和原始变量法两大类。

非原始变量法包括涡量-流函数法和涡量-速度法两种。

涡量-流函数法不直接求解原始变量 u、v、w 和 p，而是求解旋度 ω 和流函数 Ψ；涡量-速度法不直接求解流场的原始变量 p，而是求解旋度 ω 和速度 u、v、w。这两种方法的共同点为：

1）方程中不出现压力项，可避免因求解压力带来的问题。

2）由于三维流动不存在流函数，不易扩展到三维情况。

3）对于固壁面边界计算，其上的旋度极难确定，没有适宜的固体壁面上的边界条件，往往使得涡量方程的数值解发散或不合理。

原始变量法包括压力泊松方程法、人工压缩法和压力修正法等。

压力泊松方程法通过对方程取散度，将动量方程转变为泊松方程，然后求解泊松方程。人工压缩法主要是受到可压缩性气体可以通过联立求解速度分量与密度的方法来求解的启发，引入人工压缩性和人工状态方程，以此对不可压流体的连续性方程进行修正，并引入人工密度项，将连续性方程转化为求解人工密度的基本方程。但这种方法要求时间步长必须很小，因而限制了其应用范围。

压力修正法是目前工程上使用最为广泛的流场求解计算方法。其实质是迭代法，即在每一时间步长的运算中，先给出压力场的初始值，进而求出速度场，再求解根据连续方程导出的压力修正方程，对假设的压力场和速度场进行修正。如此循环往复，以求得压力场和速度场的收敛解。

压力修正法有多种实现方式，其中，压力耦合方程组的半隐式方法（SIMPLE 算法）应用最为广泛，也是各种 CFD 软件普遍采用的算法。

3．SIMPLE 求解方法

SIMPLE 算法（Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations）是一种半隐式分离求解法，它属于基于有限体积法的压力修正法，是目前工程上应用最为广泛的一种流场计算方法。它的核心是采用“猜测-修正”的过程，在交错网格的基础上来计算压力场，从而达到求解动量方程的目的。SIMPLE 算法的基本思想是利用计算网格把流动区域分为离散的控制体积；在每个控制体积上积分控制方程，形成诸如速度、压力、温度等的未知离散变量的代数方程；把离散的非线性方程组线性化；求解该方程组，得到更新的变量值。在此，把数值解定义在网格中点（格心）上。在离散方程时，对流项采用二阶迎风格式，黏性项采用二阶中心差分格式。

每一次计算迭代的步骤如下：

1）计算结果是在目前的基础上不断更新。开始时，计算变量以初始流场为基础开始更新计算。

2）利用目前的压力值和表面质量流量，依次求解三个速度分量 u、v、w 的动量方程，以获得新的速度流场。

3）由于新获得的速度流场可能不满足连续方程，这时求解由连续方程和动量方程线性化而推导出来的压力纠正方程，从而对压力、速度场和表面质量流量产生必要的纠正，以满足连续方程。

4）利用其他变量更新的数值求解湍流模型方程及辐射方程。

5）检查方程的收敛精度是否满足要求。

如果不满足收敛精度，重新迭代计算，直到满足收敛精度为止。

1.8 网格简介

计算网格的合理划分和高质量是 CFD 计算的前提条件。即使在 CFD 技术高度发达的国家，网格生成仍占整个 CFD 计算任务所需人力时间的 60%~80%。目前，随着硬件资源的更新换代，计算能力不断提高，复杂外形的网格生成技术已经成为 CFD 技术推广的一个巨大障碍，同时也是影响 CFD 计算的关键技术之一。网格品质的好坏直接影响到数值解的计算精度，而且这种影响在许多情况下是决定性的。因此网格生成受到世界各国 CFD 工作者和工业部门的重视。

采用数值方法求解控制方程时，首先是将控制方程在空间区域上进行离散，然后求解得到离散方程组。而要将控制方程进行空间离散，就要划分网格。现已发展出多种区域离散化的网格生成方法，统称为网格生成技术。网格生成技术是计算流体力学中重要的组成部分，为了得到高精度数值结果，除了高精度的数值算法外，网格的优劣也有重要的影响。

按网格点之间的相邻关系，可将计算网格分为结构化网格、非结构化网格和混合网格。混合网格是结构网格和非结构网格的混合。

1.8.1 结构化网格

结构网格如图 1-6 所示，网格点之间的邻接是有序而规则的，除了边界点外，内部网格点都有相同的邻接网格数(一维为 2 个、二维为 4 个、三维为 6 个)。结构化网格的拓扑结构具有严格的有序性。网格的定位能够用空间上的三个指标 i，j，k 识别，且网格单元之间的拓扑连接关系是简单的 i，j，k 递增或递减的关系，在计算过程中不需要存储它的拓扑结构。当流动区域易于被结构化网格所剖分、流动结构不需要作自适应处理时，结构化网格被研究者广泛采用。



图 1-6　结构化网格

对于结构化网格，按拓扑结构不同一般可以分为 O 型、C 型和 H 型三种，如图 1-7 所示。O 型拓扑结构适合于两端都是钝截面的物体，如圆形或椭圆形截面物体；C 型拓扑结构适合于一端是钝头而另一端是尖截面的物体，如锥形截面物体；H 型拓扑结构适合于两端都是尖截面的物体，如菱形截面的物体。

采用不同的网格拓扑结构生成的网格形状不同，网格的计算效率也有差异，因此要生成网格首先要分析其网格的拓扑结构。

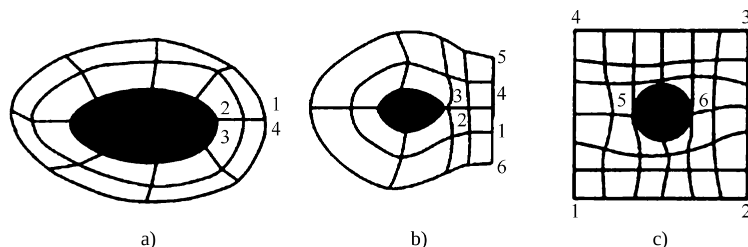


图 1-7　三种网格示意图

a) O 型网格　b) C 型网格　c) H 型网格

结构化网格数据组织方便，计算效率和计算精度高。随着近几十年在结构网格生成技术方面的不断突破，目前发达国家各主要飞机公司，如 Boeing(含 Douglas)，Airbus 和 MBB 等，用于军机、民机型号气动设计的骨干软件都采用结构化网格；结构化网格的拓扑结构相当于矩形域内的均匀网格，其节点定义在每一层的网格线上，因而其存储比较简单，所需的存储空间也相对较少。但它对复杂几何外形的网格生成比较困难。

1.8.2 非结构化网格

非结构网格节点之间的邻接是无序的、不规则的，每个网格点可以有不同的邻接网格数。非结构化网格如图 1-8 所示。

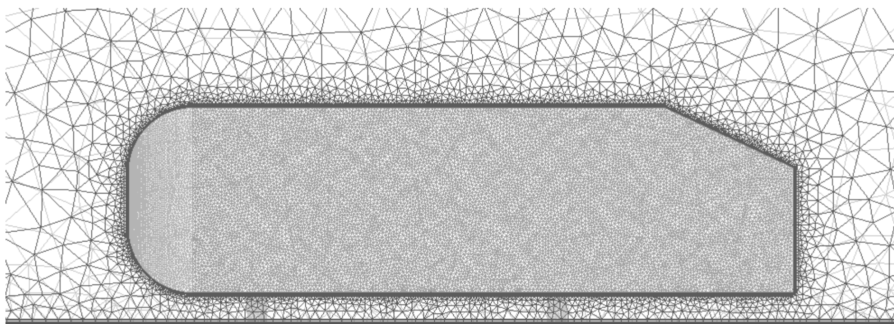


图 1-8　非结构化网格

与结构化网格相比，非结构网格有以下优点：

1）能够离散具有复杂外形的区域，因为非结构网格单元可以在任意计算区域中完全填充到整个空间，能相当精确地表示出物体的边界，从而保证了在边界处的初始准确度。

2）能够快速地在网格中增加、删除节点，处理动边界问题比较方便。

3）能够很容易地采用自适应网格方法，来提高解的质量。

当然，非结构网格生成方法也存在先天的不足，那就是它需要较大的内存空间和较长的 CPU 时间，计算分辨率较差，且不适于黏性流场的求解。目前，非结构网格方法已广泛应用于定常气动流场数值模拟之中。

非结构网格的划分方法大体上可以分为 3 类：第一类是八叉树（Octree）方法，第二类是 Delaunay 方法，第三类是锋面推进（Advancing Front）法。

八叉树方法于 20 世纪 80 年代由 Mark Shephard 首创，是一种先用六面体网格剖分流场，再在六面体内部增加节点，将原有网格单元剖分为更小的单元，直到满足网格精度的方法。在二维情况下，其初始网格则为四边形网格，相应的网格划分方法则称为四叉树（Quadtree）方法。

Delaunay 方法指的是一大类方法，这些方法的共同特点是在网格剖分的过程中满足 Delaunay 准则。所谓 Delaunay 准则又叫空心球（Empty Sphere）准则，其含义是过三角形三个顶点的圆或过四面体四个顶点的球的内部不能包含其他网格单元的节点。当然这里所谓的“其他网格的节点”不包括与当前网格单元共用的那些节点。Delaunay 方法在具体划分网格时可以先将流场划分为粗大的网格，然后通过向初始网格内部插入新的网格节点的方式逐渐使之细化，直到网格密度满足密度函数的要求，或者直到网格尺度满足尺度函数的要求为止；也可以先划分边界网格，再从边界网格根据 Delaunay 准则向流场内部推进（类似于后面的锋面推进法）；还可以先根据 Delaunay 准则生成内部网格，再根据边界网格的约束条件对网格进行修正，以得到最终计算所需的网格。

锋面推进法是由美国 George Mason 大学的 Rainald Lohner 和中国香港大学的 S.H. Lo 发展起来的。锋面推进法在网格划分的过程中，首先要在边界上划分好三角形单元，然后再根据边界上的三角形的三个顶点计算、确定第四个顶点，最终构成新的四面体。整个网格的划分过程是从边界向流场内部推进的，推进过程中存在一个“锋面”，直到从各个边界上的锋面相遇并融合，网格划分过程才结束。在锋面推进过程中，基于原有三角形边界面得到的第四个顶点，可以是新生成的顶点，也可以是流场中原来存在的节点，究竟采用原有节点还是需要新生成一个节点，都取决于对网格划分进行控制的尺度函数。在网格推进的过程中，除了要生成、确定第四顶点外，还要判断来自各个边界的锋面是否发生冲突和重叠，最后得到满足网格密度或尺度要求的网格。

无论何种网格划分方法，其网格密度通常依赖于流场的结构。在流场变量变化梯度较大的地方，比如边界层内部、激波附近区域或分离线附近，需要较大的网格密度，而在流场变量较平缓的区域则可以适当减小网格密度，以节省计算机资源。

网格在根据几何方法生成后，还必须进行光顺处理，即对畸变率较大的网格进行重新划分或调整。在实际的网格生成过程中，一方面可以通过网格的长宽比确定网格的畸变率，一方面还可以通过控制每个网格节点夹角的方式控制畸变率。

畸变率对于计算结果的影响也与畸变网格所处的位置有关。如果畸变较大的网格处于流场变量梯度较大的区域，则由畸变带来的误差就比较大，对计算结果的影响也比较严重。如果畸变较大的网格位于流场变量变化平缓的区域，则带来的误差及其影响相对而言就比较小。因此，能否正确地划分网格在很大程度上依赖于对流场流动机理的把握和对流场结构的预判。

1.8.3 混合网格

混合网格是结构网格与非结构网格的组合，它继承了两种网格的优点，也弥补了两者的

缺点，近期发展较快。如图 1-9 所示，该混合网格的具体生成方法为：在近壁面区域采用结构化网格，其他区域采用非结构化网格，HyperMesh 软件的 CFD 网格模块就可以生成这种网格。

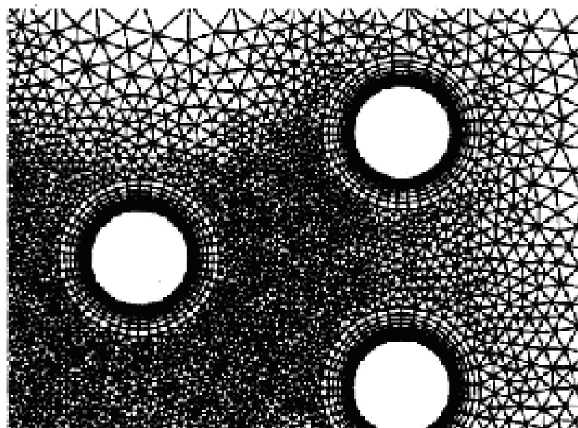


图 1-9　混合网格

1.8.4 网格质量

网格质量与具体问题的几何特性、流动特性及流场求解算法有关。网格质量影响单元间的通量计算，因此直接影响计算精度和收敛的难易程度。网格质量的考核指标包括节点分布、光滑性及单元的形状等。

（1）节点分布特性

连续性区域被离散化使流动的特征解（剪切层、分离区域、激波、边界层和混合区域）与网格上节点的密度和分布直接相关。如边界层内的节点分布对边界层解（即网格近壁面间距）影响较大，这对计算壁面剪切应力和热导率的精度有重要意义。由于平均流动和湍流的强烈作用，湍流的数值计算结果往往比层流更容易受到网格的影响，因此网格的分辨率对于湍流计算也很重要。在近壁面区域，不同的近壁面模型需要不同的网格分辨率。

（2）光滑性

临近单元体积的快速变化会导致大的截断误差。截断误差是指控制方程偏导数和离散估计之间的差值。FLUENT 可以改变单元体积或网格体积梯度来精化网格，提供网格的光滑性。

（3）网格的形状

网格的形状（包括网格的扭曲度、网格的长细比和相邻网格的面积比或体积比）对数值解的精度有明显的影响。网格的扭曲度指该网格和具有同等体积的等边网格外形之间的差别，一般要求不大于 1，扭曲度太大会降低解的精度和稳定性。网格的长细比表示网格拉伸的度量，一般要求不大于 5∶1（边界层允许使用更大长细比的网格，一般不宜大于 100∶1）。对计算网格的一个最基本的要求当然是所有网格点的 Jacobian 必须为正值，即网格体积必须

为正，其他一些最常用的网格质量度量参数包括扭角（Skew Angle）、纵横比（Aspect Ratio）以及弧长（Arc Length）等。

（4）流动流场相关性



分辨率、光滑性、单元的形状对于解的精度和稳定性的影响强烈依赖于所模拟的流场。比如，在流动开始的区域可以有过渡歪斜的网格，但在具有大流动梯度的区域内，过渡歪斜的网格可能会使整个计算精度降低或是失败。由于大梯度区域流动情况较为复杂，需要尽量保证整个流场内网格的高质量和局部位置的网格数量（局部加密），即要求密度高、光滑性好、单元歪斜小。

第 2 章　ANSYS CFD 14.0 基础知识

本章主要内容：

本章主要介绍 FLUENT、ICEM-CFD 等软件的基础知识，以及与软件相关的前处理软件、计算求解设置、求解技巧、后处理、报告以及用户自定义函数（UDF）。

本章学习目标：

✧ ANSYS FLUENT 14.0 软件功能简介及安装方法。
✧ 计算设置流程及求解技巧。
✧ CFD-Post 与计算结果后处理技巧。
✧ FLUENT 软件在 Workbench 环境中的应用。
✧ 用户自定义函数（UDF）。
✧ ICEM-CFD 和 Gambit 等网格前处理软件的基本功能。

2.1　ANSYS FLUENT 14.0 软件概述

鉴于 ANSYS 公司目前的发展方向是将旗下各流体力学求解软件归一化发展，本书将 ANSYS 14.0 版本中的 FLUENT、ICEM-CFD 等软件统称为 ANSYS CFD 14.0 软件。

2.1.1 ANSYS FLUENT 14.0 新功能

蕴含了一系列先进功能的 ANSYS 14.0，凭借高可信度的仿真结果，帮助客户更快速、便捷和低成本地开发新产品，在三大领域体现了全新价值：

1）更高精度和保真度：由于工程要求和设计复杂性的增加，仿真软件必须提供更精确的结果，能够真实反映随时间变化的运行条件。

2）更高生产力：ANSYS 14.0 软件版本包含的几十种功能特性，最大限度地减少产品开发团队在仿真过程中所需投入的时间和精力。

3）更高计算能力：ANSYS 14.0 软件解决一些工程仿真问题的速度是先前版本的 5～10 倍。即使是复杂的多物理场仿真，也能更迅速和有效地完成，加快产品开发和市场投放。

基于 ANSYS 先前的版本，ANSYS 14.0 软件继续发展智能工程仿真技术引领产品开发迈向新的阶段。通过压缩设计周期，优化产品多物理场性能，最大限度提高仿真模型精度和自动化仿真过程的效率。图 2-1 所示为 ANSYS 软件的启动界面。

（1）湍流模型

ANSYS 14.0 软件增加了多种新的改进湍流模型，能够更精确的捕捉物理现象。

1）嵌入式大涡模拟功能允许在部分流体域使用大涡模拟，而其他部分使用雷诺平均

的湍流模型。因为大涡模拟消耗资源大，而基于雷诺平均的湍流模型计算快速。这两种技术的融合，可只在关心的局部区域使用大涡模拟，在保证计算速度的前提下提高计算精度。

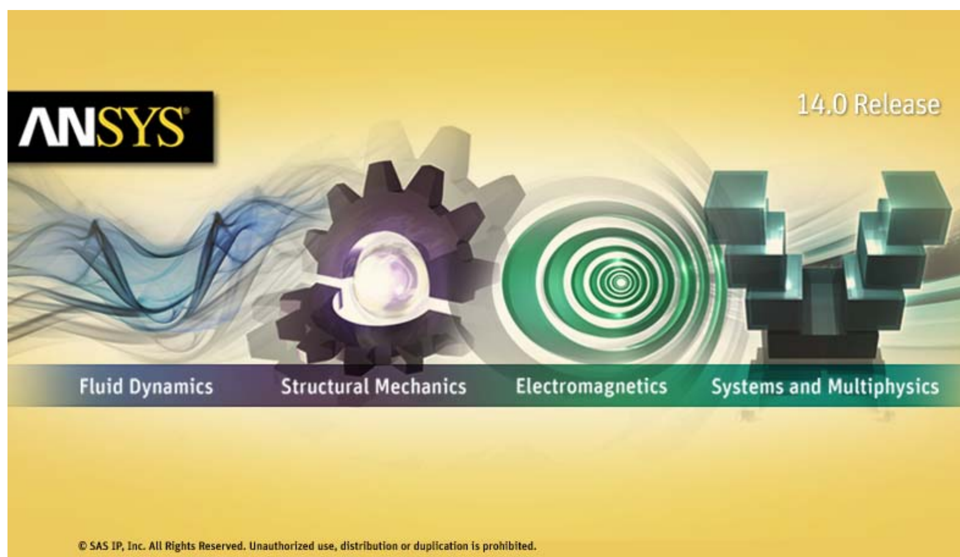


图 2-1 ANSYS 软件的启动界面

2）在 ANSYS FLUENT 软件中增加了适用于多相流的 k-omega 模型。这项功能扩展了两方程湍流模型的应用范围。

3）ANSYS FLUENT 软件增加了自适应尺度湍流模型(SAS)，这是一种非稳态的雷诺平均方法，能快速精确地模拟分离流动现象。

（2）网格替换和重划分

这个功能可提高网格质量，提升计算精度。

1）关键帧的网格替换技术允许在一系列预先划分好的网格上求解。在每个替换步，当前的求解结果插值到新的网格上。要替换的网格必须是相同的拓扑域，网格在替换时可以光顺。可以用动网格事件来定义网格替换的时间和文件名。ANSYS FLUENT 中的关键帧网格替换技术是瞬态动网格求解时的内嵌选项。

2）ANSYS 14.0 软件中新增的直角笛卡儿网格重划分功能可以增加精度。直角笛卡儿网格重划分功能在重划分整个区域时不考虑相邻区域的一致性连接关系。允许不借助前处理，能方便地从四面体网格替换到直角笛卡儿网格。

（3）多相流

ANSYS 14.0 软件增加了一些多相流模型，能满足用户更多的需求，并提供了更高的可信度和精度。

1）新的欧拉成核沸腾模型，可以模拟壁面的过冷沸腾，包括非平衡过冷沸腾和过热蒸发。

2）增加了可压缩的离散格式，可更快速的进行瞬态分析，其结果和标准的 VOF 格

式类似。

3）对拉格朗日多相流，DDPM 模型中增加了堆积极限选项，避免出现超过极限的堆积。这个选项可以模拟悬浮、流化床，也可以模拟多尺度颗粒系统。

4）ANSYS FLUENT 软件中的喷雾破碎模型中增加了 Kelvin-Helmholt-Rayleigh-Taylor（KHRT）破碎模型。这是一种高韦伯数下模拟一次破碎和二次破碎的高级模型。

5）新的耦合多级方法是可替代 VOF 方法模拟界面的技术。它在计算梯度和曲率方面有改进，并且能更好地预测界面张力。

（4）固体运动和固体温度

ANSYS 14.0 软件增加了几种提高可信度和精度的方法。在 ANSYS FLUENT 软件中，参考坐标系和动网格方法是相互独立的，可以同时设置。这样，可以在一个运动坐标系（MRF）中设置另一个 MRF。这样的例子包括转动的风扇同时带有振动；转弯的汽车同时带有轮子转动。

（5）优化设计

参数化研究能帮助公司设计出更好的产品，或对产品性能有更深入的理解。在 ANSYS FLUENT 软件求解器中，集成了流体动力学的自动形状优化，使用梯度信息、网格变形技术和优化算法。例如，指定一个管道出口的流速达到最均匀，管道形状就可以自动确定。原始的设计采用直边，出口流动不均匀，ANSYS FLUENT 软件自动形状优化技术可以给出曲线的形状，以得到更均匀的出口速度分布，如图 2-2 所示。

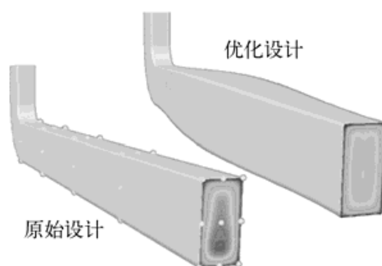


图 2-2　自动形状优化

2.1.2 FLUENT 软件概述

FLUENT 软件是国内外最为流行的 CFD 软件，其丰富的物理模型、先进的数值计算方法和强大的后处理功能，赢得了广大使用者的青睐。自 1983 年问世以来，FLUENT 就一直是 CFD 软件技术的领跑者，广泛应用于航空航天、旋转机械、高速列车、汽车、能源、石油化工、冶金等领域。从 2006 年 5 月开始，ANSYS 公司将 FLUENT 纳入 ANSYS Workbench 环境中，并加大对 FLUENT 核心 CFD 技术的投资，确保了 FLUENT 在 CFD 领域的领先地位。

作为一款通用的 CFD 软件，FLUENT 软件采用基于完全非结构化网格的有限体积法，包含基于压力的分离求解器、基于压力的耦合求解器、基于密度的隐式求解器、基于密度的显式求解器，可用于模拟从不可压缩（如汽车行业）到高超音速（如航空航天行业）范围内

的各种复杂流场。

1．FLUENT 可以计算的流动类型

FLUENT 可以计算的流动类型主要包括：



1）任意复杂外形的二维/三维流动。

2）牛顿/非牛顿流体流动。

3）无黏流/层流/湍流流动。

4）可压/不可压流动。

5）定常/非定常流动。

6）自然对流传热和强迫对流传热。

7）热传导和对流传热相耦合的传热计算。

8）辐射传热计算。

9）惯性（静止）坐标、非惯性（旋转）坐标下的流场计算。

10）动网格计算。

11）化学组分传输与气体燃烧。

12）颗粒、水滴、气泡等弥散相的轨迹计算。

13）多孔介质流动计算。

14）风扇、换热器性能的一维模型计算。

15）两相流计算。

16）源项体积任意变化的计算，源项类型包括热源、质量源、动量源、湍流源、化学组分源项等。

17）复杂表面问题中带自由流动的计算。

2．基本物理模型

FLUENT 软件提供了从不可压到可压、层流、湍流等大范围的模拟能力。在 FLUENT 中，输运现象的数学模型与所模拟的几何图形的复杂情况是紧密结合的。FLUENT 软件应用的例子包括层流非牛顿流的模拟，涡轮机和汽车引擎的湍流热传导，锅炉内煤炭粉碎机的燃烧，可压射流，空气动力外流，以及固体火箭发动机的可压化学反应流。

为了与工业应用相结合，FLUENT 提供了很多有用的功能，如多孔介质、块参数（风扇和热交换）、周期性流动和热传导、涡流、以及移动坐标系模型。移动参考系模型可以模拟单一或多个参考系。FLUENT 还提供了时间精度滑动网格方法以及计算时间平均流动流场的混合平面模型，滑动网格方法在模拟涡轮机多重过程中很有用。FLUENT 中另一个很有用的模型是离散相模型，这个模型可以用于分析喷雾和粒子流。多相流模型可以用于预测射流的破散以及大坝塌陷之后流体的运动、气穴现象、沉淀和分离。

湍流模型是 FLUENT 中很重要的一部分，湍流会影响到其他的物理现象如浮力和可压缩性。湍流模型提供了很大的应用范围，而不需要对特定的应用做出适当的调节，而且它涵括了浮力、可压缩性等其他物理现象的影响。通过使用扩展壁面函数和区域模型，还可以保证近壁面区域的求解精度。

FLUENT 可以模拟各种热传导模式，包括具有或不具有其他复杂性变化如热传导的、多孔介质的、自然的、受迫的以及混合的对流。模拟相应介质的辐射模型及子模型的设定通常

可以将燃烧的复杂性考虑进来。FLUENT 一个最强大的功能就是它可以通过耗散模型或者和概率密度函数模型来模拟燃烧现象。对于燃烧应用十分有用的其他模型也可以在 FLUENT 中使用，其中包括碳和液滴的燃烧以及污染形成模型。

2.2 FLUENT 的用户界面

2.2.1 启动 FLUENT

如图 2-3 所示，选择“开始”>“所有程序”>“ANSYS 14.0”>“Fluid Dynamics”>“FLUENT”菜单命令，运行 FLUENT 软件。

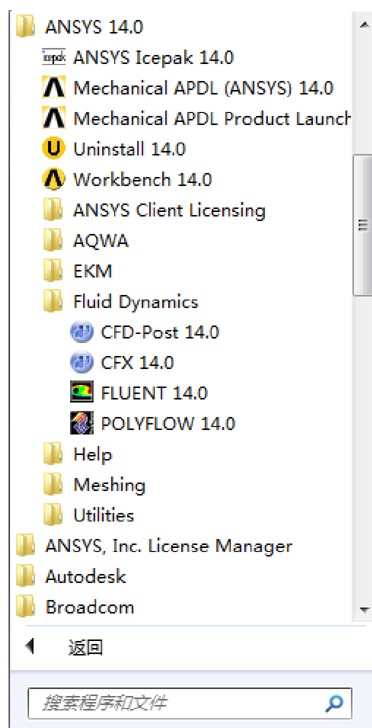


图 2-3 开始菜单启动 FLUENT

FLUENT 启动界面如图 2-4 所示。其中，“Dimension”项分别指二维模型（2D）或三维模型（3D）；“Display Options”项中，“Display Mesh After Reading”指读入网格后即显示网格，“Embed Graphics Windows”指在软件主界面显示视图区窗口，“Workbench Color Scheme”指采用 Workbench 的色彩方案；“Options”项中，“Double Precision”指双精度，“Use Job Schedule”指采用工作进度表，采用并行计算时（见图 2-5），将出现“Use Remote Linux Nodes”选项，指采用远程节点；“Processing Options”项中，“Serial”指单核运行方式，而“Parallel（Local Machine）”指并行运行方式。

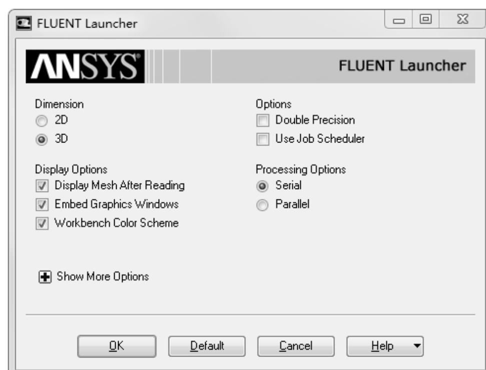


图 2-4 FLUENT 启动界面

如图 2-5 所示，选择“Parallel（Local Machine）”方式，可以设置并行计算的核数。

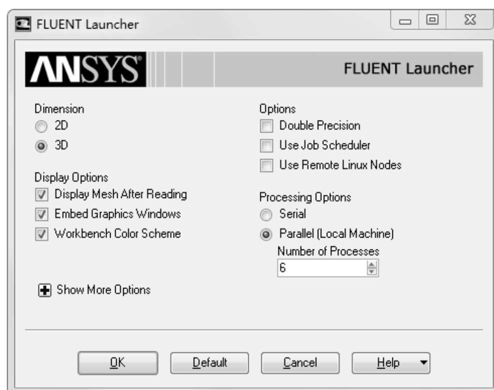


图 2-5 FLUENT 并行计算方式

单击“Show More Options”单选按钮，展开启动界面如图 2-6 所示。此处不再详述。

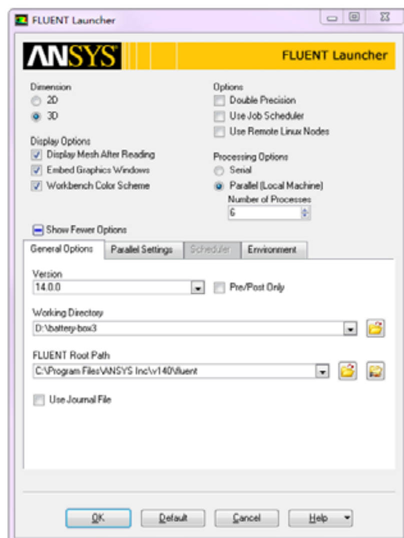


图 2-6 展开启动界面

图 2-7 和图 2-8 对比了不同的 Display Options 选项对应软件界面的不同。

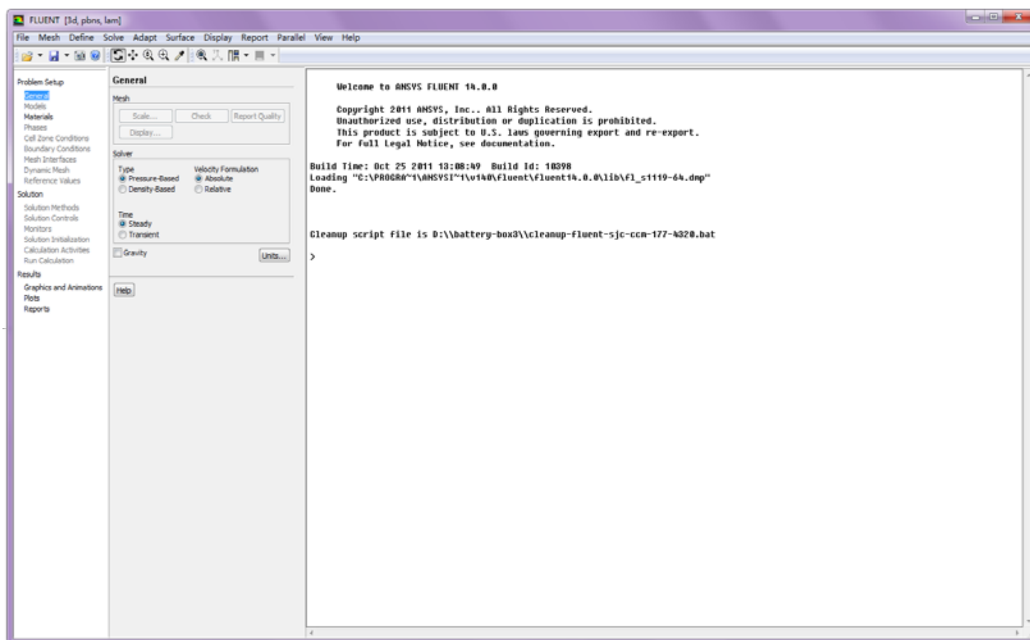


图 2-7　不在软件主界面显示视图区窗口

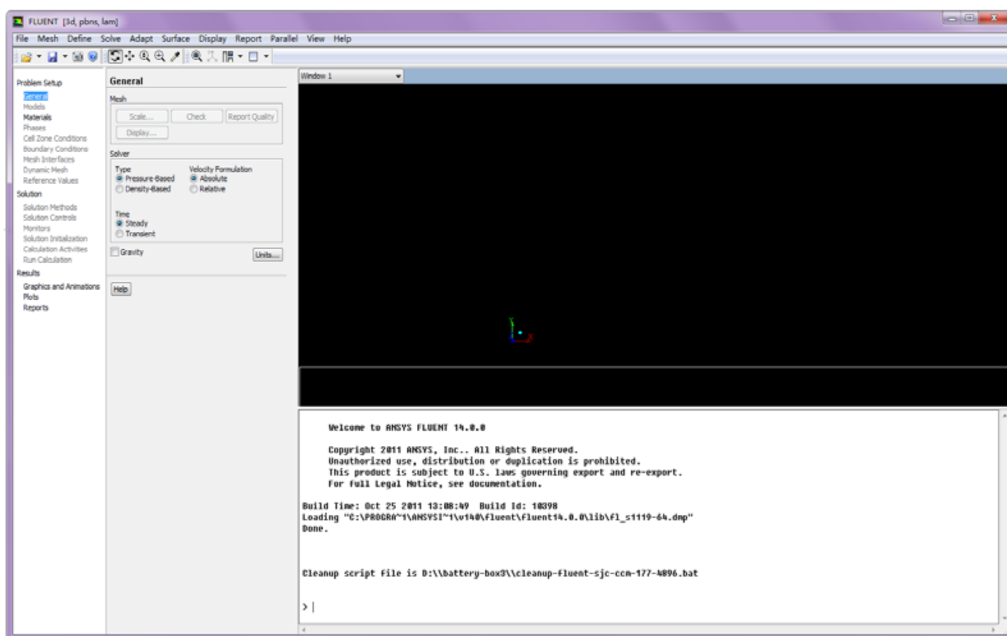


图 2-8　不采用 Workbench 的色彩方案

保持图 2-7 中的默认设置，单击“OK”按钮，进入软件主界面，进行网格导入和求解计算设置。

2.2.2 菜单项

图 2-9 所示为采用默认设置打开的 FLUENT 软件主界面。

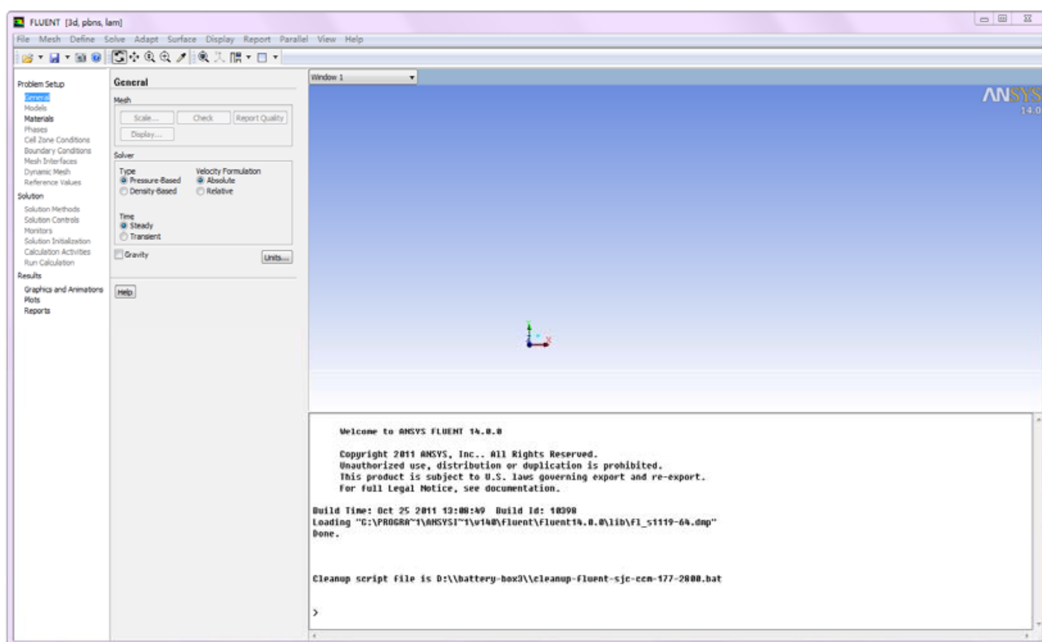


图 2-9 FLUENT 软件主界面

FLUENT 软件的菜单项依次如图 2-10~图 2-20 所示。

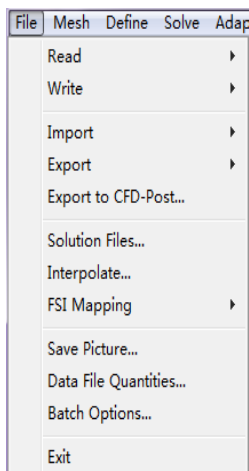


图 2-10 File 菜单

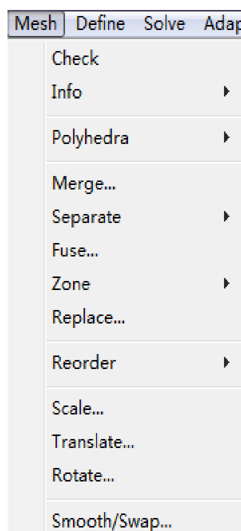


图 2-11 Mesh 菜单

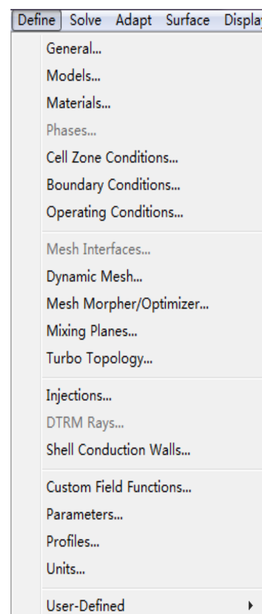


图 2-12 Define 菜单



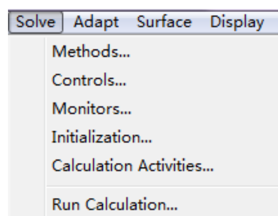


图 2-13 Solve 菜单

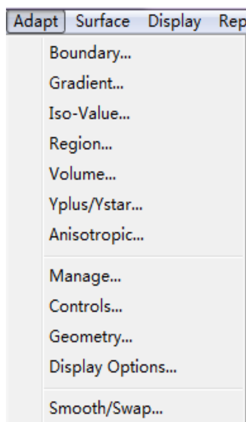


图 2-14 Adapt 菜单

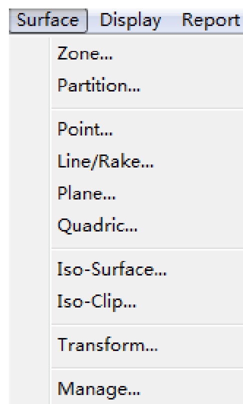


图 2-15 Surface 菜单

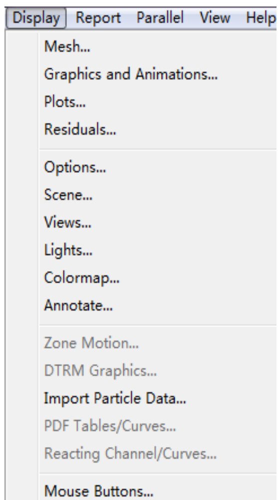


图 2-16 Display 菜单

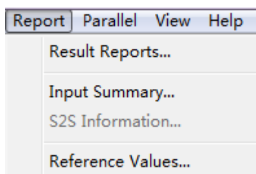


图 2-17 Report 菜单

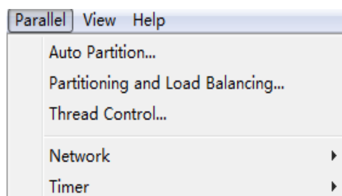


图 2-18 Parallel 菜单

- File 菜单：主要用于读入（Read）/保存（Write）cas 文件（经 FLUENT 定义后的文件，用于记录计算模型、计算设置等）和 dat 文件（经 FLUENT 计算后的数据结果文件）；导入（Import）计算用网格等数据；导出（Export）结果数据；流固耦合数据映射（FSI Mapping）；保存图片（Save Picture...）；批处理（Batch Options...）等。
- Mesh 菜单：主要用于检查网格（Check）、网格质量分析（Info）、多面体网格转化（Polyhedra）、网格合并（Merge）与分割（Separate）、网格重整（Reorder）、网格缩放（Scale...）、网格平移（Translate...）、网格旋转（Rotate...）和网格光顺（Smooth/Swap）等。
- Define 菜单：主要用于定义各种求解模型的相关设置。
- Solve 菜单：主要用于定义各种求解方法（Methods...）、监测点（Monitors..）的相关设置，计算初始化（Initialization...）以及运行计算（Run Calculation...）。
- Adapt 菜单：主要用于依据各种边界（Boundary...）、区域（Region...）与体积（Volume...）等进行网格自适应。

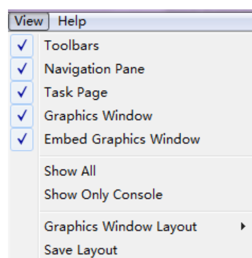


图 2-19 View 菜单

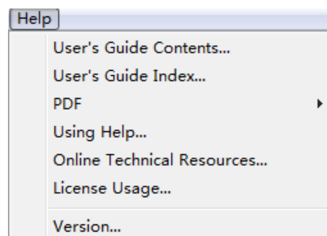


图 2-20 Help 菜单

- Surface 菜单：主要用于点（Point..）、迹线（Line/Rake...）和等值面（Iso-Surface...）等后处理功能的设置。
- Display 菜单：主要用于图表/动画（Graphics and Animations..）、图例（Colormap...）、注释（Annotate...）等后处理功能的设置。
- Report 菜单：主要用于各种计算结果后处理功能的设置。
- Parallel 菜单：主要用于网格分区（Auto Partition...）、线程控制（Thread Control...）等功能的设置。
- View 菜单：主要用于工具栏（Toolbars）、视图区（Graphics Window）等软件功能区域的显示设置。
- Help 菜单：包括软件自带的帮助内容和帮助使用说明，并可进行软件使用相关问题的查询。

2.2.3 项目树

FLUENT 用户界面中的项目树设计为从上至下排列，如图 2-21 所示。在项目树中选择要设置的菜单项，参数输入窗口在右侧打开。项目树右侧对应为项目树菜单项的属性栏。

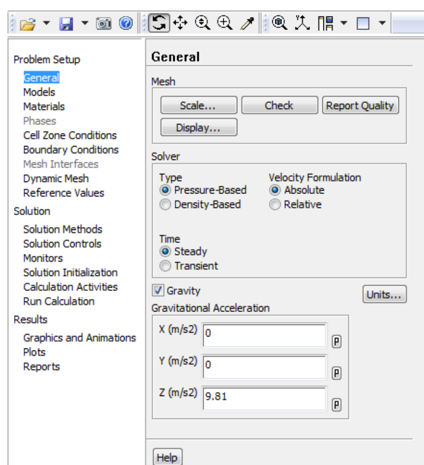


图 2-21 项目树

可以看到，Problem Setup 栏包括 General、Models、Materials、Phases、Cell Zone Conditions、Boundary Conditions、Mesh Interfaces、Dynamic Mesh 和 Reference Values 共 9

项，根据具体计算项目的不同，进行不同项的设置；Solution 栏包括 Solution Methods、Solution Controls、Monitors、Solution Initialization、Calculation Activities 和 Run Calculation 共 6 项；Results 栏包括 Graphics and Animations、Plots 和 Reports 共 3 项。

2.2.4 鼠标功能

鼠标功能和二维/三维求解器的选择有关，可以在求解器中设定。

一般情况下，对于 2D 求解器，左键表示平移；中键表示缩放；右键表示选择。

对于 3D 求解器，左键表示旋转；中键表示缩放，中键单击表示确定中心点；右键表示选择。

FLUENT 具有便捷的流场探针功能，右键单击屏幕视图，即可在信息栏输出该点的流场信息。

2.3 FLUENT 的求解技巧

2.3.1 FLUENT 的数值算法

FLUENT 软件采用有限体积法，提供了 3 种数值算法：非耦合隐式算法、耦合显式算法和耦合隐式算法，分别适用于不可压、亚音速、跨音速、超音速乃至高超音速流动。

（1）非耦合隐式算法

非耦合隐式算法（Segregated Solver）源于经典的 SIMPLE 算法，适用于不可压缩流动和中等可压缩流动。该算法对动量方程进行了压力修正，而不用对 N-S 方程组联立求解，目前已在多个领域得到了成熟的发展和经验验证。非耦合隐式算法又称分离式算法，拥有多种燃烧、化学反应及辐射、多相流模型与其配合，适用于低速流动的 CFD 模拟。

（2）耦合显式算法

耦合显式算法（Coupled Explicit Solver）是由 FLUENT 软件设计人员与 NASA 联合开发的，用于求解可压缩流动。有别于 SIMPLE 算法，耦合显式算法对整个 N-S 方程组联立求解，空间离散采用通量差分分裂格式，时间离散采用多步 Runge-Kutta 格式，并采用了多重网格加速收敛技术。对于稳态计算，还采用了当地时间步长和隐式残差光顺技术。该算法稳定性好，内存占用少，应用广泛。

（3）耦合隐式算法

耦合隐式算法（Coupled Implicit Solver）是 FLUENT 软件特有的算法。该算法也对整个 N-S 方程组联立求解，由于采用隐式格式，因而计算精度和收敛性要优于耦合显式算法，但却需要占用较多的内存资源。该算法可以求解低速流动到高速流动大范围的工况。

2.3.2 FLUENT 的湍流模型

FLUENT 软件中的湍流模型主要包括：

（1）混合长度模型

零方程模型，模拟简单的流动，计算量小。



（2）Spalart-Allmaras 模型

直接求解修正的湍流黏性的一方程模型，针对大网格的低成本湍流模型，适用于模拟气动和封闭腔内流动，可以选择包括湍动能产生项的应变率以提高对涡流的模拟精度（如叶轮机械、车体、机身和导弹等）。

（3）标准 k-ε 模型

求解 k 和 ε 的基本两方程模型，模型系数通过试验拟合得到，适合完全湍流情况的初始迭代、设计选型和参数研究，鲁棒性最好，可以处理黏性加热、浮力、压缩性等物理现象。

（4）RNG k-ε 模型

k–ε 方程中的常数是通过重正规化群理论分析得到的，而不是通过试验得到，修正了耗散率方程。适用于设计快速应变、中等涡、局部转捩的复杂剪切流动（如边界层分离、室内通风、块状分离、涡的后台阶分离等）。

（5）Realizable k-ε 模型

与 RNG k-ε 模型性能相似，计算精度更优。耗散率（ε）方程由旋涡脉动的均方差导出，可精确预测平板和圆柱射流的传播，对包括旋转、有大反压力梯度的边界层、分离、回流等现象有更好的预测结果。

（6）标准 k-ω 模型

包含压缩性效应，转捩流动和剪切流修正等子模型，在模拟近壁面边界层、自由剪切和低雷诺数流动时性能更好。可以用于模拟转捩和逆压梯度下的边界层分离（如高速列车外流模拟和旋转机械性能计算）。

（7）SST k-ω 模型（Shear Stress Transport k–ω 模型，SSTk–ω 模型）

SST k–ω 模型在近壁面处使用 k–ω 模型，而在边界层外采用 k–ε 模型。包含了修正的湍流黏性公式，考虑了湍流剪切应力的效应。SST 一般能更精确地模拟反压力梯度引起的分离点和分离区大小。与标准 k-ω 模型性能类似，对于壁面距离的依赖使得它不适合于模拟自由剪切流动。

（8）雷诺应力模型（RSM 模型）

最好的基于雷诺平均的湍流模型，通过平均速度脉动的乘积，导出 6 个独立的雷诺应力分量输运方程，避免各向同性涡黏性假设，需要更多的 CPU 时间和内存消耗。适于模拟强旋转流和涡的高度各向异性流、复杂三维流动。由于方程间强耦合性，收敛稍差。

（9）大涡模拟

模拟瞬态的大尺度涡，通常和 F-W-H 噪声模型联合使用。

（10）分离涡模拟

改善了大涡模拟的近壁处理，更为实用，可以模拟大雷诺数的气体流动。

（11） V2F 湍流模型

与标准 k–ω 模型性能类似，但结合了近壁湍流各向同性和非局部压力应变效应。

截至目前，没有一个适用于所有流动的高级模型，用户应根据实际情况选择湍流模型。选择湍流模型时一般应考虑以下因素：流动现象；计算机资源；项目要求；计算精度；计算时间；近壁面处理的选择。

湍流模型的选择一般应按下述流程进行：

1）计算特征雷诺数，判断是否是湍流。

2）如果存在转捩，考虑使用转捩模型。

3）划分网格前，预估近壁面的 y+。

4）除了低雷诺数流动和复杂近壁面现象（非平衡边界层）外，用壁面函数方法确定如何准备网格以 RKE（realizable k−ε）开始，如果需要，改用 S−A，RNG，SKW，SST 或者 V2F。

5）对高度旋涡流动、三维、旋转流动，使用 RSM。

以钝体平板流为例，用 4 种不同的湍流模型模拟了绕过钝体平板的流动。平板绕流的计算模型如图 2−22 所示，共采用 8700 个四边形网格，在回流再附着区和前缘附近加密，并进行了非平衡边界层处理。

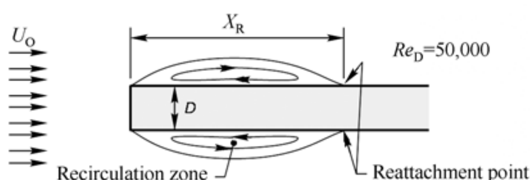


图 2−22　平板绕流的计算模型

计算结果如图 2−23 所示。可以看出，相对于标准 k−ε 模型，其他 3 种方法的湍流动能强度（Turbulent Kinetic Energy）计算结果较为接近，也较为准确。

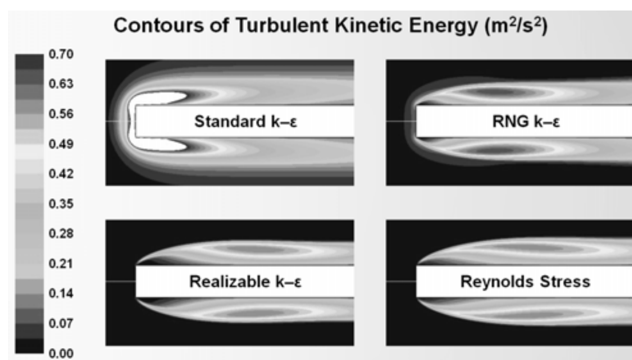


图 2−23　湍流动能强度计算结果对比

2.3.3 FLUENT 的物理模型

1．多相流模型

相具有可定义的边界，对周围流场有特定的动力响应。相一般分为固体、液体和气体，但也可指其他形式，有不同化学属性的材料，但属于同一种物理相（如液−液）。

多相流体系统分为一种主流体相和多种次流体相，如图 2−24 所示。其中一种流体是连续的（主流体，Primary Phase）；其他相是离散的（Secondary Phase），存在于连续相中；可以有多种次流体相，代表不同尺寸的颗粒。常见的多相流体系如图 2−24 所示。

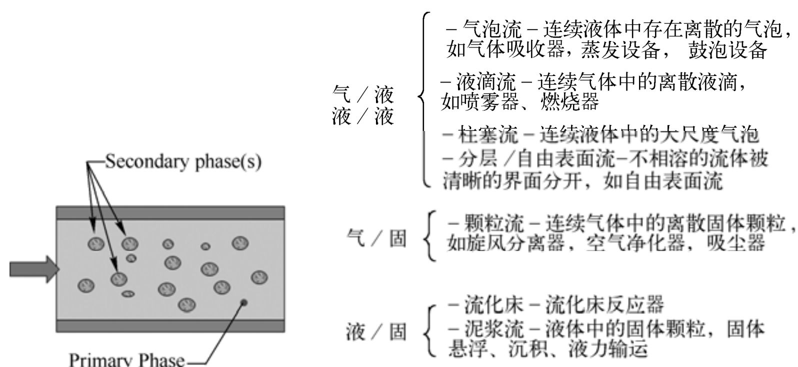


图 2-24　常见的多相流体系

FLUENT 包括 4 种不同的多相流模型：Discrete Phase Model（DPM）、Volume of Fluid Model（VOF）、Eulerian Model 和 Mixture Model。

选择合适的多相流模型非常重要，这取决于流体是分层的还是离散的（由两相间的长度尺度界定）；还需要考虑 Stokes 数（颗粒松弛时间和流体特征时间的比例）。

2．化学反应模型

FLUENT 包含了从计算均相反应到非均相反应的多个反应模型，如炉子、锅炉、热处理炉、燃气轮机、火箭发动机和内燃机等。

（1）污染物模型

污染物模型包括如下 3 种。

1）NOx 形成模型。用于预测定性的 NOx 形成趋势。FLUENT 包括 3 种 NOx 产生机理：Thermal NOx、Prompt NOx、Fuel NOx。典型案例：喷入氨水或尿素。

2）烟灰形成模型。包括 Moos-Brookes 模型、一步模型、两步模型。典型案例：烟灰对辐射吸收的影响。

3）SOx 形成模型。包括求解 SO_2，H_2S，或 SO_3 方程。一般 SOx 预测都作为后处理过程来进行。

（2）DPM 模型

DPM 模型特征包括如下。

1）颗粒/液滴/气泡的轨迹在拉格朗日坐标系求解。

2）颗粒和连续相可以进行热、质量、动量的交换。

3）每一条轨迹代表一组有相同初始属性颗粒的行为。

4）单个颗粒的互相影响被忽略。

5）离散相体积分数必须小于 10。

多个子模型包括如下。

1）离散相的加热/冷却。

2）液滴的蒸发和沸腾。

3）可燃固体的挥发分析出和焦炭燃烧。

4）喷雾模型模拟液滴破碎和聚合。

5）磨损/增长。

应用范围包括：颗粒分离、分级、喷雾干燥、浮质沉积、气泡喷射、液体燃料和煤粉燃烧等。

（3）表面反应

对于化学组分沉积到表面的反应，将沉积的组分处理为和气相组分不同的另外一种组分。

1）对每个吸收表面组分求解地点平衡方程。

2）可以考虑详细表面反应机理（任意的多步反应，任意数量的气相组分/沉积组分）。

3）CHEMKIN 中的表面反应机理可以读入 FLUENT。

4）表面反应可以在壁面或多孔介质中发生。

5）可以在不同的表面定义不同的表面反应机理。

应用范围包括：催化反应、CVD（化学沉积）。

3．动网格

模拟运动部件有 5 种方法：单参考坐标系法、多参考坐标系法、混合平面法、滑移网格法和动网格法。前三种方法主要用于稳态，而滑移网格和动网格本质是瞬态的。激活这些模型，将流体域由固定改为动坐标系或动网格设置。大多数物理模型和动坐标系或动网格法兼容（如多相流、燃烧、传热等）。

许多问题需要考虑平移或旋转的部件。对移动域，有两种基本的模型方法：

1）运动的参考坐标系，包括单参考坐标系法、多参考坐标系法和混合平面法。参考坐标系和运动域联系在一起，通过修正控制方程来考虑运动坐标系。

2）运动/变形域，包括滑移网格法和动网格法。域的位置和形状在静止坐标系下跟踪，求解本质上是瞬态的。

（1）单参考坐标系模型（SRF）

SRF 把单一的运动域和一个坐标系连接起来。所有的流体域在运动坐标系下定义，并在旋转坐标系中引入了附件加速度。使用运动坐标系的意义在于：在静止坐标系下流场是瞬态的，使用旋转坐标系后流场可以看做稳态的。其优势在于：用稳态方法求解；边界条件更简单；调试更快捷；更容易的后处理的分析。

（2）多参考坐标系模型（MRF）

单参考坐标系不适合包括有静止域和运动域的多域问题。此时，可以把域分割为多个域，一些域旋转，一些域静止。域之间通过交界面（interface）传递数据，如图 2-25 所示。对于域之间的交界面，处理方式分为以下几种：多参考坐标系模型（MRF）稳态（近似）；混合平面模型（MPM）稳态（近似）；滑移网格模型（SMM）瞬态（精确）。

（3）混合平面模型（MPM）

MPM 方法是对多级轴流和离心旋转机械的稳态解法，适合于求解由多个单通道、旋转或静止流体域组成，有自己的进口、出口、壁面和周期边界（每个域是一个 SRF 模型）的求解域，如图 2-26 所示的多级叶轮问题。

MPM 方法的做法是：对每个域求解稳态的 SRF，通过边界条件链接各个域，链接域的边界称为混合平面；通过混合平面的变量是周向平均值，随每步迭代更新，分布可以是径向或轴向；求解收敛后，混合平面将调整为一般流动条件。

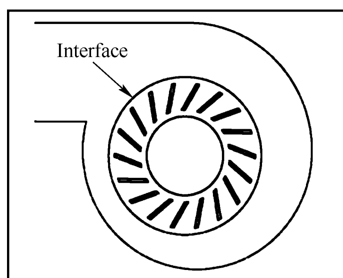


图 2-25 多域问题（叶轮+蜗壳）

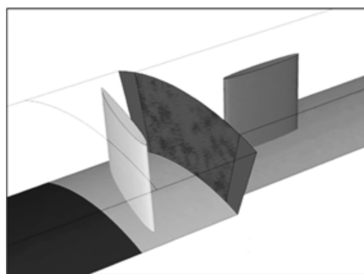


图 2-26 多级叶轮问题

MPM 的优势在于求解只需要一个流道，和叶片数量无关。

（4）滑移网格模型（SMM）

旋转机械中，由静止部件和旋转部件的相对运动导致的瞬态相互作用，一般分为位差相互作用（压力波相互作用）、尾迹相互作用、激波相互作用 3 种情况。MRF 和 MPM 模型都忽略了瞬态相互作用，仅限于瞬态效应小的流动。而如果瞬态效应不能忽略，可以使用 SMM 方法考虑静止部件和旋转部件的相对运动。

SMM 模型与 MRF 模型类似，计算域分为运动域和静止域，由非一致网格界面连接，如图 2-27 所示。但与 MRF 模型不同的是，每个域的网格是时间的函数，随时间改变，这样使得问题本身就是瞬态的。

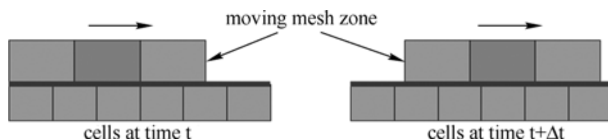


图 2-27 滑移网格的运动形式

SMM 模型和 MRF 模型的另一个不同之处是，控制方程有新的动网格形式，在静止坐标系下求解绝对量。没有使用运动坐标系形式，如动量方程源项中没有附加加速度的作用；方程组是通用的运动/变形网格形式的一种特殊情况，而假设为刚性网格运动和滑移，非一致网格界面。

（5）动网格方法（DM）

FLUENT 的动网格技术，可以帮助用户解决诸如内燃机汽缸内的活塞运动、容积泵、机翼摆动、阀门开关过程、动脉扩张和收缩等复杂问题。

FLUENT 引入动网格模型来移动边界，并调整网格。动网格的生成方法有以下 3 种，如图 2-28 所示。

1）层铺法：随着边界的移动，单元层生成或消失。单元层对应的面网格只能是四边形，对应的体网格只能是结构网格（六面体或 O 型网格），适合边界在小范围或大范围内的线性或旋转运动。

2）局部重划法：随着边界移动，网格扭曲大的区域网格重新划分。适用于三角形/四面体网格类型，边界运动范围大。

3）弹簧式：弹簧式适用于小范围的边界变形，单元的连接和数量不变，弹簧式适用于

小范围变形的三角形/四面体网格。

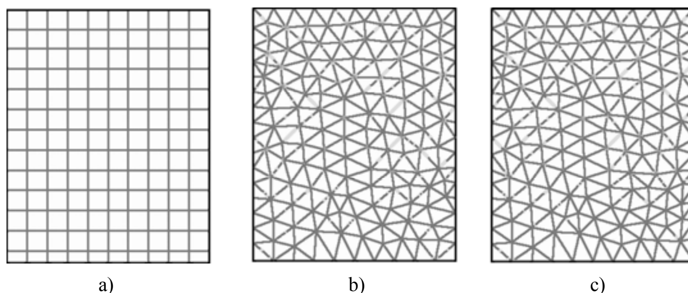


图 2-28　动网格的生成方法
a) 层铺法　b) 局部重划法　c) 弹簧式

2.3.4 FLUENT 的边界条件

讲述 FLUENT 的边界条件前，先要明确以下 3 个概念。

（1）流体域

流体域是一系列单元的集合，需要选择流体材料，在其上求解所有激活的方程。对多组分或多相流，流体域包含这些相的混合物。

输入的选择项包括：多孔介质域（Porous Zone）、层流域（Laminar Zone）、源项（Source Terms）、固定值域（Fixed Values）和辐射域（Participates In Radiation），如图 2-29 所示。

（2）多孔介质

多孔介质是一种特殊的流体域。可在 Fluid 面板中激活多孔介质域，通过用户输入的集总阻力系数来确定流动方向的压降，如图 2-30 所示。

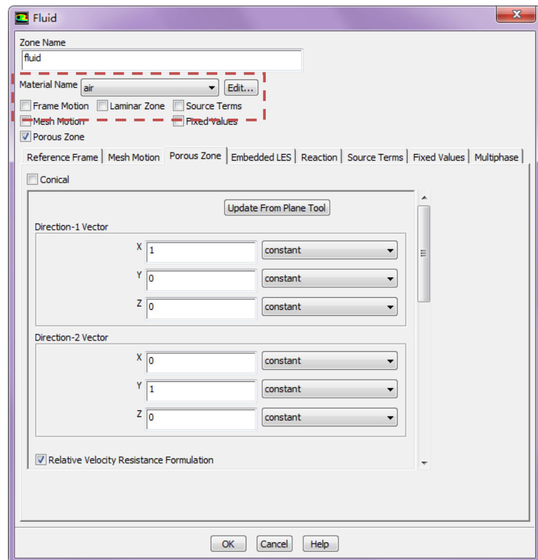


图 2-29　流体域可输入的选择项

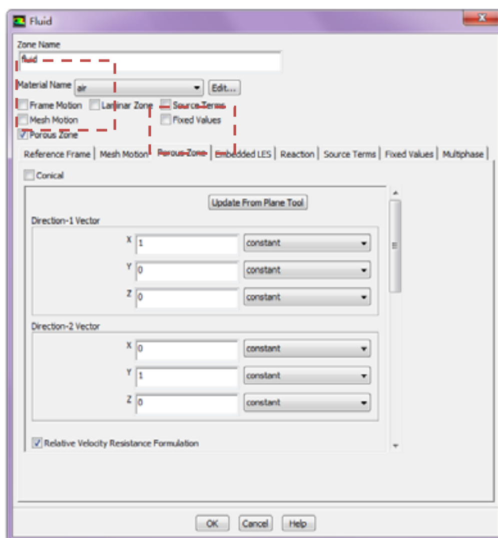


图 2-30　多孔介质设置对话框

多孔介质可用来模拟通过多孔介质的流动，或者流过其他均匀阻力的物体，如堆积床、过滤纸、多孔板、流量分配器、管束等。一般设置方法为：输入各方向的黏性系数和惯性阻力系数。

（3）固体域

固体域是一组只求解导热问题而不求解流动方程的单元集合。设置时，只需从材料库中输入对应名称的材料即可。输入的选项包括多孔介质域（Porous Zone）、层流域（Laminar Zone）、源项（Source Terms）、固定值域（Fixed Values）和动网格区域（Mesh Motion），如图 2-31 所示。注意，如果临近固体域的单元是旋转周期边界，需要指定旋转轴。

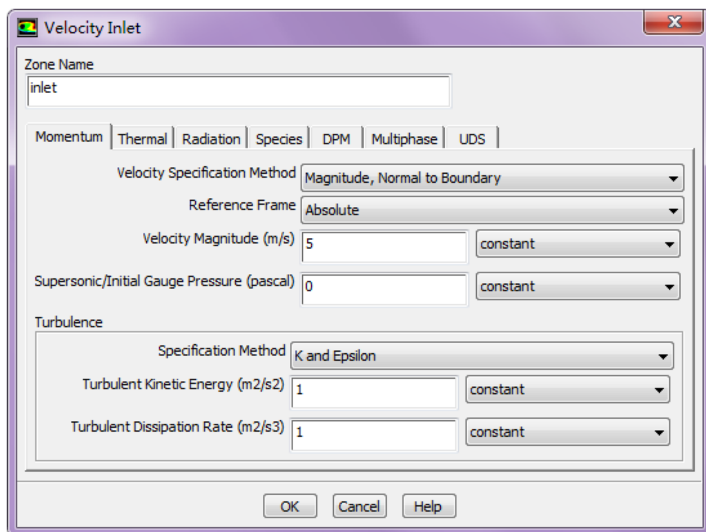


图 2-31　固体域设置对话框

FLUENT 的边界条件包括：

1）流动进、出口边界条件。

2）壁面、轴对称和周期性边界。

3）Internal cell zones：fluid，solid (porous is a type of fluid zone)。

4）Internal face boundaries：fan，radiator，porous jump，wall，interior。

1．流动进口、出口边界条件

FLUENT 提供了 10 种类型的流动进、出口条件，它们分别是：

1）速度进口条件：给出进口速度及需要计算的所有标量值，如图 2-32 所示。

- 指定速度，需要输入的参数包括速度大小、垂直入口、方向分量、大小和方向。
- 指定入口均匀速度分布。如用 UDF 或者分布文件，可以指定分布入口条件。
- 速度入口用于不可压流动，不建议用于压缩流。
- 速度大小可以是负值，则意味着出口。

2）压力进口条件：给出进口的总压和其他需要计算的标量进口值，如图 2-33 所示。

- 压力入口适用于压缩和不可压缩流。
- 压力入口被处理为从滞止点到入口的无损失过渡。

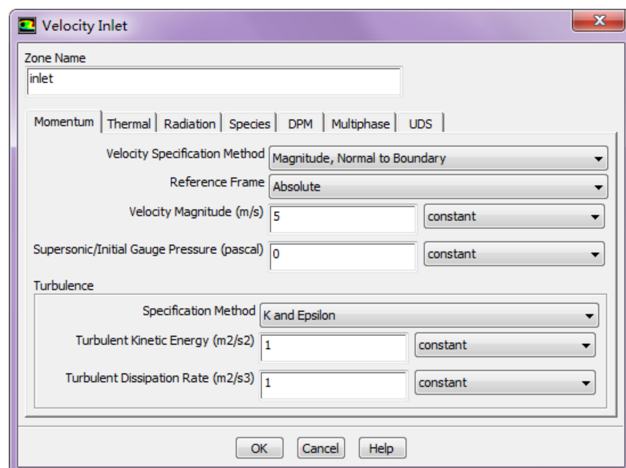


图 2-32　速度进口条件

- FLUENT 计算静压和入口的速度。
- 通过边界的流量随内部求解和指定的流动方向而改变。
- 需要输入的参数包括表总压、超音速/初始表压、入口流动方向、湍流量（对于湍流情况）、总温（如果有传热和/或压缩）。

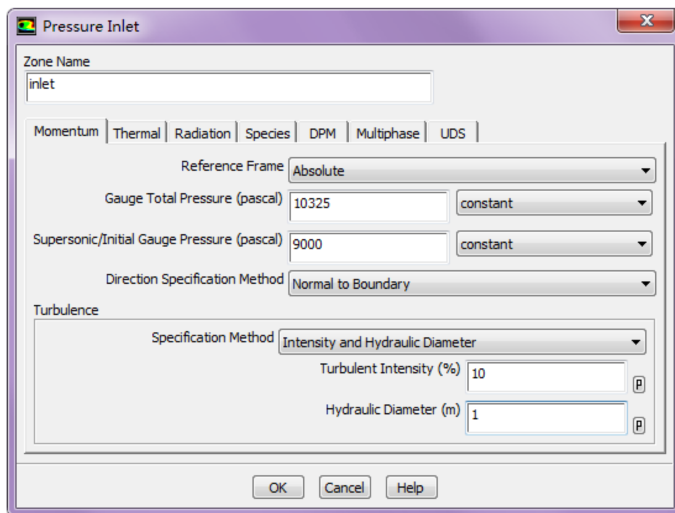


图 2-33　压力进口条件

3）流量进口条件：主要用于可压缩流动，给出进口的质量流量，如图 2-34 所示。对于不可压缩流动，由于密度是常数，没有必要采用该边界条件。

需要输入的参数包括：质量流量或流率、超音速/初始表压（如果当地为超音速，取静压，如果是亚音速，忽略此项；如果初场由此边界设定，用于初场计算）、总温 （在 Thermal 面板上，对不可压缩流取静温）。

4）压力出口条件：给定流动出口的静压，如图 2-35 所示。对于有回流的出口，该边界

条件比 outflow 边界条件更容易收敛。

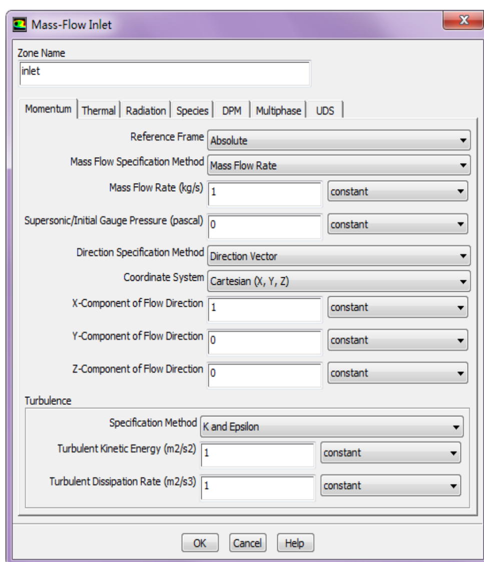


图 2-34 流量进口条件

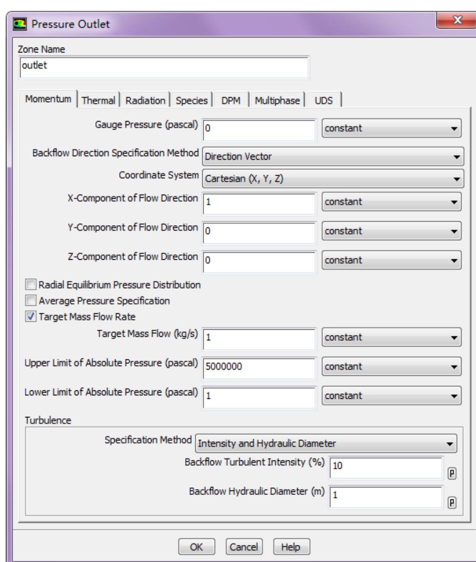


图 2-35 压力出口条件

- 适用于压缩和不可压流动。
- 如果流动在出口是超音速的，指定的压力被忽略。
- 在外流或非封闭区域流动，作为自由边界条件。
- 要求输入的参数包括表压（流体流入环境的静压）、回流量（当有回流发生时，起到进口的作用）。
- 对理想气体（可压缩）流动，可以使用无反射出口边界条件。

5）压力远场条件：该边界条件只对可压缩流动适合。用来模拟无穷远处的可压缩自由流，输入静压和自由流马赫数；只有用理想气体计算时可以使用压力远场条件。

6）outflow 条件：该边界条件用以模拟在求解问题之前，无法知道出口速度或者压力；出口流动符合完全发展条件，除了压力之外，出口处其他参量梯度为零的不可压缩流动，如图 2-36 所示。该边界条件不适合可压缩流动。

- 不需要压力或速度信息，出口平面的数据由内部数据外插得到，边界上加入质量流量平衡。
- 所有变量的法向梯度为零，流体在边界为充分发展。
- outflow 条件针对不可压缩流动，不能和压力进口同时使用（必须和速度进口一起使用），不能用于变密度的非稳态流动。
- 有回流时收敛性很差。
- 最终解如有回流，不能使用此条件。

7）inlet vent 条件：进口风扇条件需要给定一个损失系数，流动方向和环境总压和总温。

8）intake fan 条件：进口风扇条件需要给定压降，流动方向和环境总压和总温。

9）outlet vent 条件：排出风扇给定损失系数和环境静压和静温。

10）exhaust fan 条件：排出风扇给定压降，环境静压。

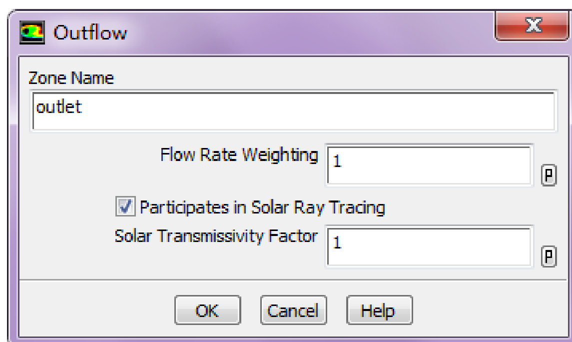


图 2-36　outflow 条件

2．压力进口边界条件

压力进口边界条件通常用于给出流体进口的压力和流动的其他标量参数，对计算可压和不可压问题都适合。压力进口边界条件通常用于进口流率或流动速度未知时的流动分析。这类流动在工程中较为常见，如浮力驱动的流动问题。压力进口条件还可以用于处理外部或非受限流动的自由边界。

压力进口条件需要输入的参数有：总压、总温、流动方向、静压、湍流量（用于湍流计算），辐射参数（考虑辐射）、化学组分质量分数（考虑化学组分）、混合分数及其方差（用PDF 燃烧模型）、progress variable（预混燃烧计算）、离散相边界条件（稀疏相计算）及第二相体积分数（多相计算）等，如图 2-37 所示。

对于不可压缩流动：

$$p_{\text{total}} = p_{\text{static}} + \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{2-1}$$

式中　p_{total}——全压，单位为 Pa；

p_{static}——静压，单位为 Pa；

ρ——气流密度，单位为 kg/m^3；

v——气流速度，单位为 m/s。

对于可压缩流动：

$$p_{\text{total}} = p_{\text{static}}\left(1 + \frac{k-1}{2}M^2\right)^{k/(k-1)} \tag{2-2}$$

式中，k——比热比；

M——气流马赫数。

流场中的压力 p_s' 包括了势压 $\rho_0 gx$，即 $p_s' = \rho_0 gx + p_s$，或 $\frac{\partial p_s'}{\partial x} = \rho_0 g + \frac{\partial p_s}{\partial x}$。把 $(\rho - \rho_0)g$ 在体积力源项中考虑，如果密度没有变化，则在压力计算中不需要考虑势压。我们输入的压力也不需要考虑势压。

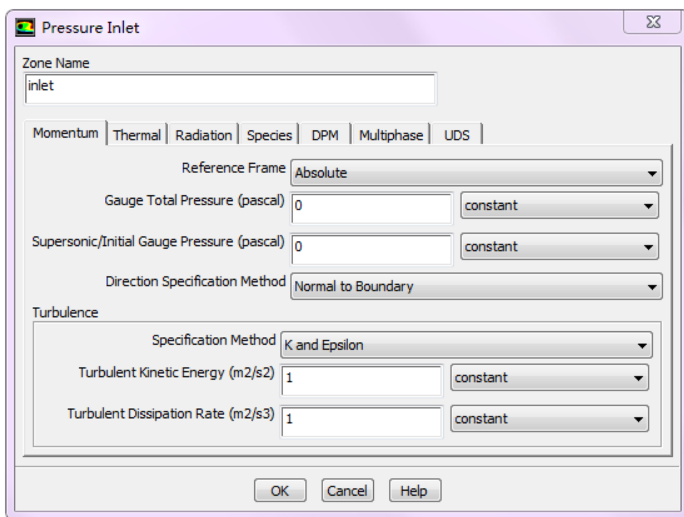


图 2-37　压力进口边界条件

3．速度进口边界条件

给定进口的速度及其他相关标量值。该边界条件适用于不可压缩流动问题，但对可压缩问题不适合，因为该进口条件会使得进口的总温或总压有一定范围的波动。

输入量包括：速度大小、方向或各速度分量；周向速度（轴对称有旋流动），静温（考虑能量）等 。

4．质量流量进口边界条件

质量流量进口边界条件给定进口的质量流量。局部进口总压是变化的，用以调节速度，从而达到给定的流量。这使得计算的收敛速度变慢。所以，如果压力边界条件和质量边界条件都适合流动时，优先选择用压力进口条件。对于不可压缩流动，由于密度是常数，可以选择用速度进口边界条件。

质量进口条件包括两种：质量流率和质量通量。质量流率是单位时间内通过进口总面积的质量。质量通量是单位时间单位面积内通过进口的质量。如果是二维轴对称问题，质量流率是单位时间内通过 2π 弧度的质量，而质量通量是通过单位时间内通过一弧度的质量。

5．进口通风（Inlet Vent）边界条件

给定进口损失系数，流动方向和进口环境压力及温度。

对于进口通风模型，假定进口风扇无限薄，通风压降正比于流体动压头和用户提供的损失系数。假定 ρ 是流体密度， K_L 是无量纲损失系数，则流动方向上的压降 Δp 为：

$$\Delta p = K_L \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{2-3}$$

式中，v——与通风方向垂直的速度分量，单位为 m/s。

6．进口风扇边界条件（Inlet Fan）

给定压力阶跃，流动方向和环境（进口）压力和温度。假定进口风扇无限薄，并且有不连续的压力升高，压力升高量是通过风扇速度的函数。如果是反向流动，风扇可以看成是通风出口，并且损失系数为 1。

压力阶跃可以是常数，或者是流动方向垂直方向上速度分量的函数形式。

7．压力出口边界条件

压力出口边界条件给定出口的静压（表压）。该边界条件只能用于模拟亚音速流动。如果当地速度已经超过音速，则该压力在计算过程中就不采用了。压力根据内部流动计算结果给定，其他量都是根据内部流动外推出边界条件。该边界条件可以处理出口有回流问题，合理的给定出口回流条件，有利于解决有回流出口问题的收敛困难问题。

出口回流条件需要给定的参数有：回流总温（如果有能量方程）、湍流参数（湍流计算）、回流组分质量分数（有限速率模型模拟组分输运）、混合物质量分数及其方差（PDF 计算燃烧）。如果有回流出现，给的表压将视为总压，所以不必给出回流压力。回流流动方向与出口边界垂直。

在出口压力边界条件给定中，需要给定出口静压（表压）。当然，该压力只用于亚音速计算。如果局部变成超音速，则根据前面来流条件外推出口边界条件。需要特别指出的是，这里的压力是相对于前面给定的工作压力。

FLUENT 给出了径向平衡出口边界条件供大家选择（适用于三维和轴对称有旋流动）。这时候，只有在半径很小的区域使用给定的静压边界条件，其他地方，假定径向速度可以忽略而计算得到，压力梯度为：

$$\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{\rho v_\theta^2}{r} \tag{2-4}$$

式中 r——径向方向；

v_θ——周向旋转速度，单位为 m/s。

即使是周向旋转速度为零，该边界条件也可以用。

8．压力远场边界条件

如果已知自由流的静压和马赫数，可以利用 FLUENT 提供的压力远场边界条件来模拟该类问题。该边界条件只适合用理想气体定律计算密度的问题，而不能用于其他问题。为了满足压力远场条件，需要把边界放到我们关心区域足够远的地方。

压力远场边界条件需要给定边界静压和温度及马赫数，可以是亚音速，跨音速或者超音速。并且需要给定流动方向，如果有需要还必须给定湍流量等参数。

9．自由流出边界条件

如果在求解问题前，不能知道流出口的压力或者速度，这时候可以选择自由流出边界条件。这类边界条件的特点是不需要给定出口条件（除非是计算分离质量流，辐射换热或者包括颗粒稀疏相问题）。出口条件都是通过 FLUENT 内部计算得到。但并不是所有问题都适合，如下列情况，就不能用自由流出边界条件：

1）包含压力进口条件。

2）可压缩流动问题。

3）有密度变化的非稳定流动问题（即使是不可压缩流动）。

用流出边界条件时，所有变量在出口处扩散通量为零。即出口平面从前面的结果计算得到，并且对上游没有影响。计算时，如果出口截面通道大小没有变化，采用完全发展流动假设流动速度、温度等分布在流动方向上无变化。当然，在径向允许有梯度存在，只是假定在

垂直出口面方向上扩散通量为零。

10．出口通风边界条件

出口通风边界条件用于模拟出口通风情况，并给定一个损失系数和环境（出口）压力和温度。

出口通风边界条件需要给定的参数有：静压、回流条件、辐射参数、离散相边界条件和损失系数。

出口通风边界条件的压力损失也按式（2-3）计算。

11．排气扇边界条件

排气扇边界条件用于模拟外部排气扇，给定一个压升和环境压力。

假定排气扇无限薄，并且流体通过排气扇的压升是流体速度的函数。

12．壁面边界条件

对于黏性流动问题，FLUENT 默认设置是壁面无滑移条件，但读者也可以指定壁面切向速度分量（壁面平移或者旋转运动时），也可以给出壁面切应力从而模拟壁面滑移。根据当地流动情况，可以计算壁面切应力和与流体换热情况。壁面热边界条件包括固定热通量，固定温度，对流换热系数，外部辐射换热，外部辐射换热与对流换热等。

对于壁面条件下换热计算边界条件，对流换热系数是根据当地流场计算得到（湍流水平、温度和速度曲线）。

黏性流动中，壁面采用无滑移边界条件。可以指定剪切应力、热边界条件等。壁面换热边界条件的设置如图 2-38 所示。对一维或薄壳导热计算，可以指定壁面材料和厚度。

对湍流可以指定壁面粗糙度，基于局部流场的壁面剪切应力和传热。另外，壁面也可以设置平移或旋转速度。

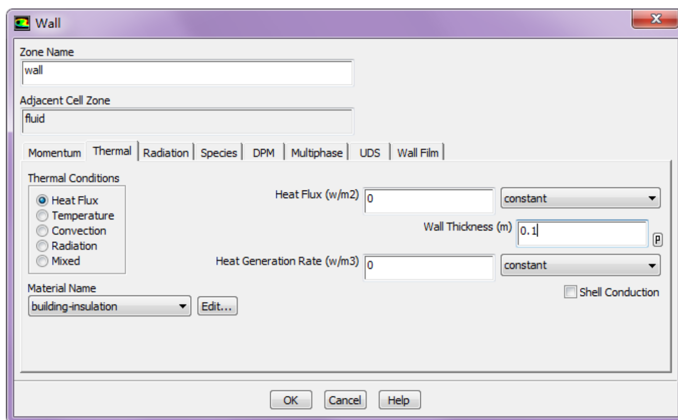


图 2-38　壁面换热边界条件的设置

13．对称边界条件

对称边界条件应用于计算的物理区域，或者流动及传热场是对称的情况。在对称轴或者对称平面上，没有对流通量，因此垂直于对称轴或者对称平面的速度分量为零。在对称轴或者对称平面上，没有扩散通量，即垂直方向上的梯度为零。因此在对称边界上，垂直边界的

速度分量为零，任何量的梯度为零。

计算中不需要给定任何参数，只需要确定合理的对称位置。该边界条件可以用于黏性流中运动边界处理。

14．周期性边界条件

如果几何边界的流动和换热是周期性重复的，则可以采用周期性边界条件。FLUENT 提供了两种类型：一类是流体经过周期性重复后没有压降（Cyclic）；另外一类有压降（Periodic）。叶轮机械的性能计算采用单流道模型，就是采用周期性边界条件，用以减少全局网格量。

15．内部边界面

内部边界面只在单元的面上定义。一般内部边界面的厚度为零，内部边界面上的变量可以突变。内部边界面用以实现风扇、散热器、多孔突变区域等物理模型。

2.3.5 FLUENT 的求解器

1．FLUENT 求解器的种类

FLUENT 中有压力基和密度基这两种求解器，如图 2-39 所示。

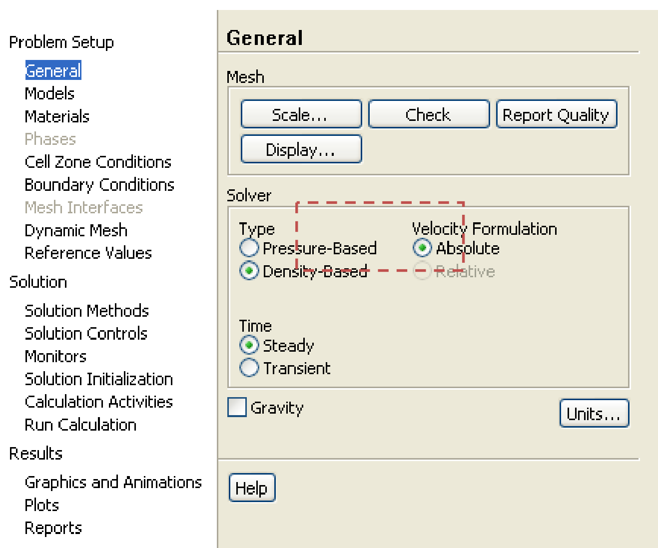


图 2-39　压力基和密度基求解器

压力基求解器以动量和压力为基本变量，通过连续性方程导出压力和速度的耦合算法。压力基求解器包括分离求解器和耦合求解器两种算法。其中，分离求解器通过压力修正和动量方程顺序求解；耦合求解器（PBCS）通过压力和动量方程同时求解。压力基求解器的应用范围覆盖从低压不可压缩流到高速压缩流，需要的内存少，求解过程灵活。压力基耦合求解器（PBCS）适用于大多数单相流，比分离求解器性能更好；不能用于多相流（欧拉）、周期质量流和 NITA；比分离求解器多用 1.5～2 倍内存。

密度基耦合求解器（DBCS）以矢量方式求解连续性方程、动量方程、能量方程和组分方程。通过状态方程得到压力，而其他标量方程则按照分离方式求解。DBCS 可以显式或隐

式方式求解。其中，隐式使用高斯赛德尔方法求解所有变量；显式使用多步龙格库塔显式时间积分法。密度基耦合求解器（DBCS）适用于密度、能量、动量、组分间强耦合的现象，如伴有燃烧的高速可压缩流动，超高音速流动、激波干扰等。隐式方法一般优于显式，因为其对时间步有严格的限制。显式方法一般用于流动时间尺度和声学时间尺度相当的情况，如高马赫激波的传播。



2．FLUENT 求解器的优秀之处

（1）网格构造信息

FLUENT 的网格文件中存储了所有的网格信息：节点坐标、连接关系、域的定义。

和几何定义类似，网格定义如下：

- Node：边的交叉点 / 网格顶点
- Edge：面的边（由两个节点定义）
- Face：单元的边界，由一组边定义
- Cell：域离散的控制体
- Zone：一系列节点、边、面或单元的集合

计算域由以上所有的信息组成。对纯流动问题，域只包括流体域；对共轭换热问题，或流固耦合问题，域还会包含固体域。

边界条件设置在面上，材料属性和源项设置在单元上。

（2）网格的重新排序和编辑

通过选择“Grid”>“Reorder”>“Domain”或“Grid”>“Reorder”>“Zones”命令，FLUENT 允许用户可以对整个域（Domain）或指定的域（Zones）进行排序。网格的重新排序能使得邻近的单元排在一起，可以提高内存读取效率，减少计算带宽。

在网格菜单中，也可以对面/体做如下编辑：分割域、合并域；通过合并重合的面或节点来融合域；平移、旋转、镜像面或体域；拉伸面形成体域；替换体域或删除体域；激活体域或冻结体域。

（3）多面体网格转换

FLUENT GUI 可以把四面体或混合网格转换为多面体网格。其优势在于：可以提高网格质量，减少单元数量；用户可以控制转换过程。但 FLUENT GUI 不支持自适应，不能再次转换，目前还不能支持光顺、交换、合并和拉伸等网格编辑工具。

（4）分布文件和求解结果插值

FLUENT 允许通过分布文件和数据插值对选择的变量在面或体上插值。例如，试验数据或者其他 FLUENT 计算结果里的入口速度分布，或者粗网格的计算结果插值到密网格上。

分布文件是包含选择变量的点数据文件，可以通过 FLUENT 进程读/写。

如图 2-40 所示，通过选择“File”>“Write”>“Profile...”命令，可以将计算模型各边界条件上的变量输出为分布文件。

插值数据文件包括选择变量的离散数据，可以在 FLUETN 中读入和写出。

如图 2-41 所示，通过选择“File”>“Interpolate...”，可以将计算模型各边界条件上的变量输出为插值数据文件。

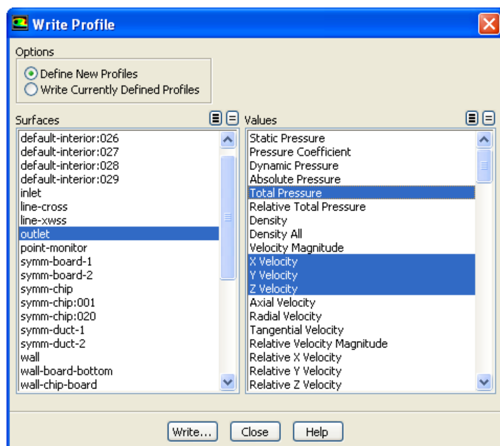


图 2-40　输出分布文件

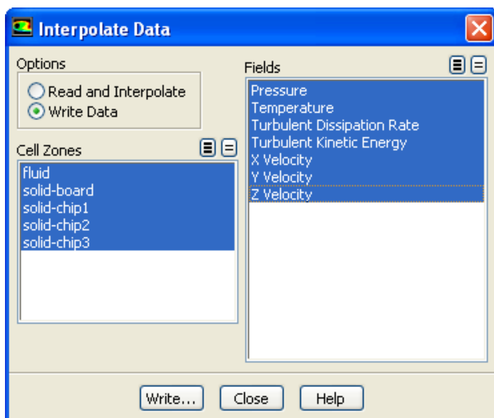


图 2-41　输出插值数据文件

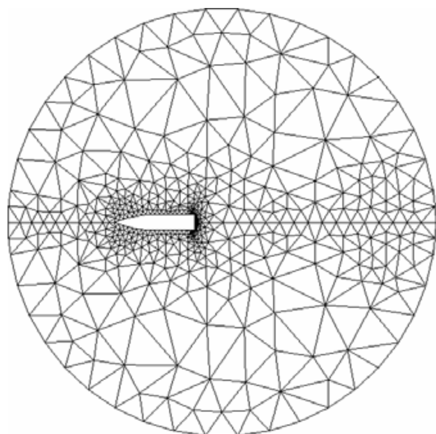
（5）网格自适应

网格自适应是求解过程中根据需要加密或粗化网格的技术。其操作方法是把满足条件的网格标注并存储起来。如需要，可以显示或更改这些网格，通过“Adapt”命令对这些网格进行自适应。

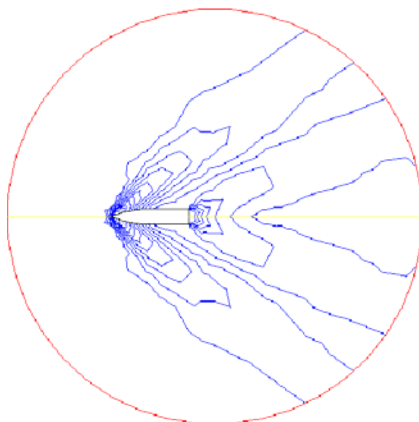
网格自适应的过程为：所有变量的梯度或等值线→边界上的所有单元→指定形状里的所有单元→网格体积变化率→近壁面网格的 y+。

实现自适应的一些技巧包括：合并注册的适应区；显示适应函数的等值线；显示标注的适应网格；给出基于网格尺寸和数量的适应限制。

以导弹的超音速流场为例，可以对压力梯度大的区域自适应网格以更好的捕捉通过激波的压力突变。通过比较图 2-42 和图 2-43 可知，基于求解结果的网格自适应允许更好的解析弓形激波和膨胀波。观看过火箭发射过程的读者，应该对图 2-42 的计算结果更为认可。



初始网格



压力分布等值线图

图 2-42　网格自适应前

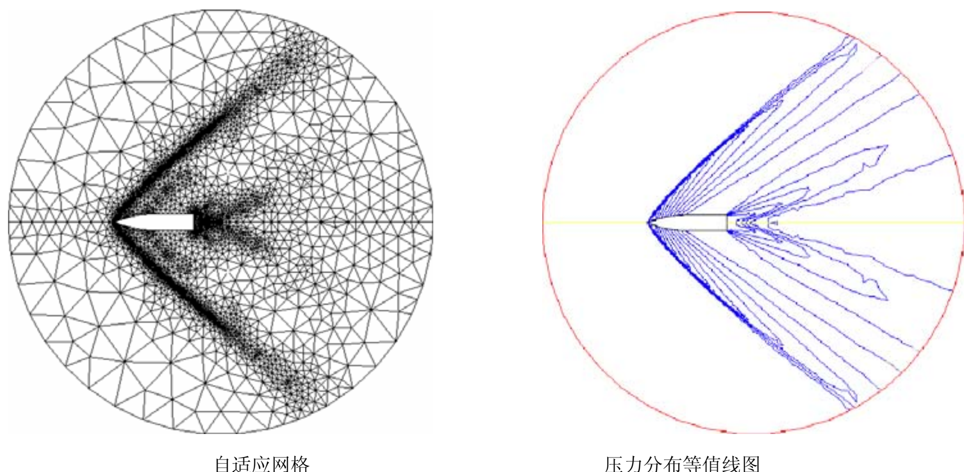


图 2-43　网格自适应后

2.3.6 瞬态 CFD 分析

1．瞬态流动的根源

（1）自然发生的瞬态流动

由于流体中不稳定性的增长或者非平衡的初场引发的瞬态流动，如自然对流、湍流涡、流动波（重力波、激波）等。

（2）强迫瞬态流动

时间平均的边界条件，源项引起的瞬态流动，如喷嘴的脉冲、旋转机械的动静干涉等。

2．模拟瞬态流场的方法

1）稳态解：流场不再随时间变化。

2）时间周期解：流场形态随时间脉动重复出现。

目标可以简化为分析预定时间间隔的流动，如自由表面流、移动的激波等。

同时应抽取关心的变量：特征频率（如斯德鲁哈尔数）、时间平均或/RMS 值、时间相关的参数（如热固体的冷却时间，污染物的停留时间）、特殊数据（快速傅立叶变换）等。

瞬态流动的模拟流程一般为：

1）激活瞬态求解器。

2）设置物理模型和边界条件，允许通过 UDF 或分布文件设置瞬态边界条件。

3）指定初场，最好用有物理意义的初场，如稳态流场。

4）设置求解器和监测器。

5）设置动画和数据输出选择。

6）选择时间步和最大迭代次数。

7）设定时间步数。

8）计算。

在 General 菜单下选择“Transient”命令，即可激活瞬态求解器，如图 2-44 所示。

开始执行迭代前，需要设置附加的控制：求解器设置、动画、数据输出/自动保存选项。

3．选择瞬态时间步长

选择瞬态时间步长的方法大致如下：

在“Run Calculation”项中设置时间步长 Δt，Δt 必须小到能解析和时间相关的特征，确定每个时间步的最大迭代步内能收敛。

时间步大致可按照下式估计：

$$\Delta t \approx \frac{\text{Typical cell size}}{\text{Characteristic flow velocity}} \tag{2-5}$$

也可以选择能解析流动特征的时间步（在指定脉动周期的情况下）

指定零时间步时迭代，求解器会仅仅在当前时间步下收敛。对许多瞬态流动，PISO 格式有助于加速收敛。

由于 FLUENT 使用全隐格式，所以不存在用来确定 Δt 的稳定性判据。但是为了正确模拟瞬态现象，有必要将 Δt 设定为比所模拟的系统最小时间常数小一个量级。通过观察每一个时间步中达到 FLUENT 收敛所需要的迭代次数，可以判断 Δt 的选择是否合理。每一个时间步的理想迭代次数是 10~20。如果 FLUENT 需要更多迭代次数才能收敛则说明时间步太大了。如果 FLUENT 在每个时间步中只需要很少的迭代次数，就可以增加 Δt。瞬态计算中最常见的问题就是计算启动后很快衰退。因此最好在前 5~10 个时间步中选择较小的 Δt，然后在计算过程中逐渐增加 Δt。

对于周期性问题，周期性的最终解是不依赖起始阶段求解过程的时间步的。由于不关心流动开始阶段的精确解，因此在起始阶段可以定义“大”时间步长。以大时间步长开始计算，解能更快成为周期性。然而，当解达到周期性时，应减少时间步长以获得精确解。如果采用二阶时间精度求解，那么在计算过程中改变时间步长会影响当前解的精度。以大时间步长开始计算，在求解过程中改变时间步长不应超过 20%。不能在最后几个周期改变时间步长以确保解达到周期性状态。

4．瞬态模型选择

在“Run Calculation”项中设置自适应时间步长（Time Step Size），如图 2-45 所示。FLUENT 软件基于局部截断误差自动调整时间步长，也可以通过 UDF 指定。在进行大涡模拟时，需要使用时间平均的统计。另外，在使用密度基求解器时，需要设定 Courant 数，以定义密度基显式求解器的全局时间步长，或密度基隐式求解器的伪时间步长（真实时间步长仍然必须在迭代面板中定义）。

5．执行迭代

最通常的时间推进格式是迭代格式。求解器在当前时间步收敛然后推进到下一个时间步。当达到 Max Iterations/Time Step（见图 2-45）或满足收敛标准时，时间推进到下一步。各时间步依次收敛直至达到总时间步。

执行迭代前，必须定义初始化：设置流体域的初始质量和流场的初始状态。

非迭代时间推进法（NITA）可以用于更快速的计算时间。

瞬态模拟的求解技巧包括：

1）压力-速度耦合采用 PISO 格式，比标准 SIMPLE 格式更易收敛。

2）选择合适的时间步长以至每个时间步长内能收敛三个量级。

3）每个时间步的迭代次数大约 20 次，减少时间步长比增加每步的迭代次数要好。

4）记住对瞬态问题，精确的初场和边界条件一样重要，初场一定要符合真实物理条件。

5）在计算前定义希望得到的动画。

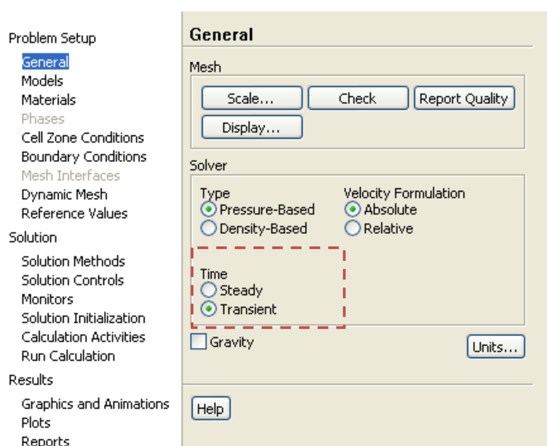


图 2-44 激活瞬态求解器

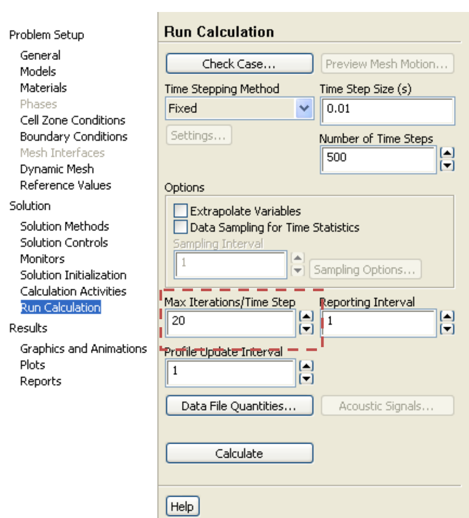


图 2-45 Max Iterations/Time Step

2.3.7 其他应注意的项

1. 收敛性保证

计算收敛时应该满足：

1）所有离散的守恒方程（动量、能量等）在所有的单元中满足指定的误差或者结果随计算不再改变。

2）全局的质量、动量、能量和标量达到平衡。

使用残差历史曲线来监测收敛时：

1）一般地，残差下降 3 个量级表示至少达到定性的收敛，流场的主要特征已经形成。

2）压力基求解器的能量残差应下降到 10^{-6}。

3）组分残差应下降到 10^{-5}。

如果监测到求解已经收敛，但计算结果还在改变，或还有大的质量/热量不平衡，这表示求解还未收敛。此时，用户应该减小残差标准或关闭监测残差的窗口，继续迭代直至计算收敛。

如图 2-46 所示，在“Convergence Criterion”项中选择“None”，即可关闭监测残差的窗口。

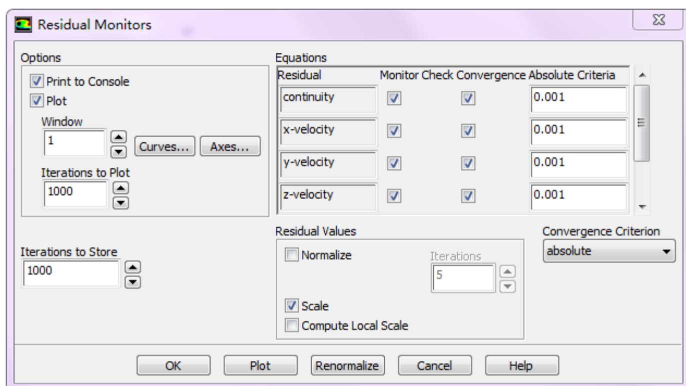


图 2-46　关闭监测残差的窗口

对一些病态问题，差质量的网格或不合适的求解设置，都可能出现数值不稳定性。一般表现为残差曲线上扬（发散）或不下降，如图 2-47 所示。

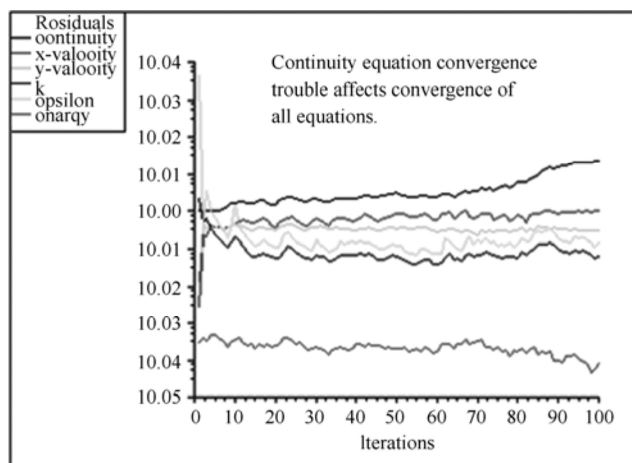


图 2-47　残差曲线上扬

发散意味守恒方程的不平衡增加，没收敛的结果会误导使用者。

解决方法包括：

1）确保问题是物理合理的。

2）用一阶离散格式计算一个初场。

3）调节压力基求解器的松弛因子（见图 2-48）。

4）对密度基求解器，减少 Courant 数。

5）重新生成网格或加密质量差的网格。

注意网格自适应不能提高扭曲度大的网格质量。

2．Courant Number 的设置方法

在 FLUENT 软件中，用 Courant Number 来调节计算的稳定性与收敛性。对密度基求解器，即使稳态问题，也存在瞬态项，因此需要用 Courant Number（库朗数）定义时间步长。

对显式求解器，由于稳定性约束限制了最大库朗数，一般要求不能超过 2（默认为 1）；有收敛困难时减少库朗数。对隐式求解器，库朗数没有稳定性约束限制，默认值为 5，一般为保证收敛，取值为 2。

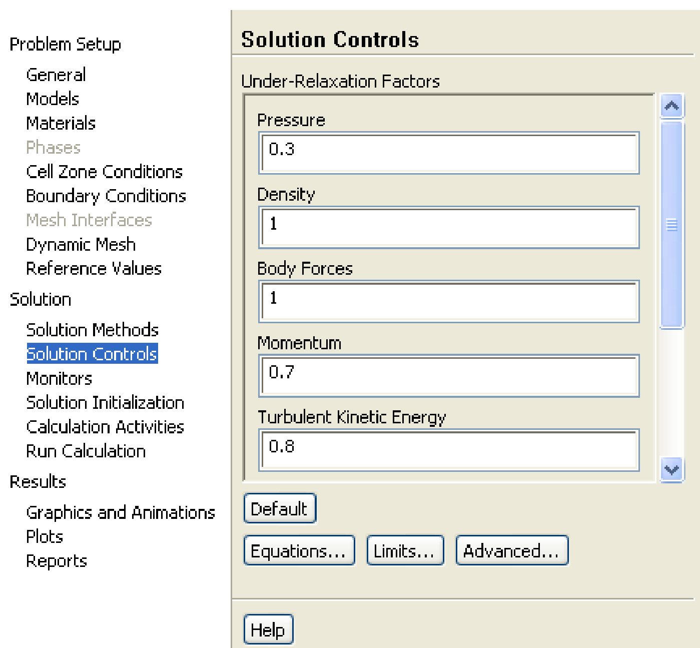


图 2-48　松弛因子选项

一般来说，随着库朗数从小到大的变化，收敛速度逐渐加快，但是稳定性逐渐降低。在计算的过程中，建议把库朗数从小开始设置，看看迭代残差的收敛情况，如果收敛速度较慢而且比较稳定的话，可以适当增加库朗数，根据自己具体的问题，找出一个比较合适的库朗数，让收敛速度能够足够得快，而且能够保持它的稳定性。

库朗数实际上是指时间步长和空间步长的相对关系，系统自动减小 courant 数，这种情况一般出现在存在尖锐外形的计算域，当局部的流速过大或者压差过大时出错，把局部的网格加密再试一下

3．网格无关解

当加密网格，结果不再改变时，称为网格无关解。

得到网格无关解的过程一般为：

1）生成一个新的、更密的网格。具体做法是：回到网格阶段，手动调整网格；或创建自适应网格，插值原结果到密网格上。FLUENT 提供动态网格自适应，会根据用户定义的标准自动改变网格。

2）继续计算直至收敛。

3）比较两次结果的解，如两次结果的差别满足要求，则视为网格无关解。

4）如有必要，重复以上过程。

4．FLUENT Journals

FLUENT 可以使用 journal 文件以批处理方式运行。journal 是包括 TUI 命令的文本文件。

FLUENT TUI 允许命令的缩写，具体如下。

- ls：列表工作目录下的文件
- rcd：读入 case 和 data 文件。
- wcd：写 case 和 data 文件。
- rc/wc：读/写 case 文件。
- rd/wd：读/写 data 文件。
- it：迭代。

批处理文件中的 TUI 命令可以在非交互模式下自动运行

TUI 命令 file/read-bc 和 file/write-bc 可以用来读写 FLUENT 中的设置到一个文件中。

如下是一段 FLUENT 的 Journals 代码。

```
; Read case file
rc example.cas.gz
; Initialize the solution
/solve/initialize/initialize-flow
; Calculate 50 iterations
it 50
; Write data file
wd example50.dat.gz
; Calculate another 50 iterations
it 50
; Write another data file
wd example100.dat.gz
; Exit FLUENT
exit
yes
```

2.4 CFD-Post 与计算结果后处理

FLUENT 结果有以下两种后处理方式。

1）FLUENT 后处理工具：集成在 FLUENT 软件中的历史遗留产品。

2）ANSYS CFD-Post：ANSYS CFD 产品的新一代后处理工具，可以单独运行或在 Workbench 下运行。

本节主要讲述 CFD-Post 的主要功能。ANSYS CFD-Post 软件包括了分析 CFD 结果的许多工具，如等值面、速度矢量图、等值线图、流线图/迹线图、二维曲线图和动画等。可以表达包括任意用户定义的变量（通过流场函数定义或 UDF 定义）。

1．GUI 布局

CFD-Post 的用户界面（即 GUI 布局）如图 2-49 所示。

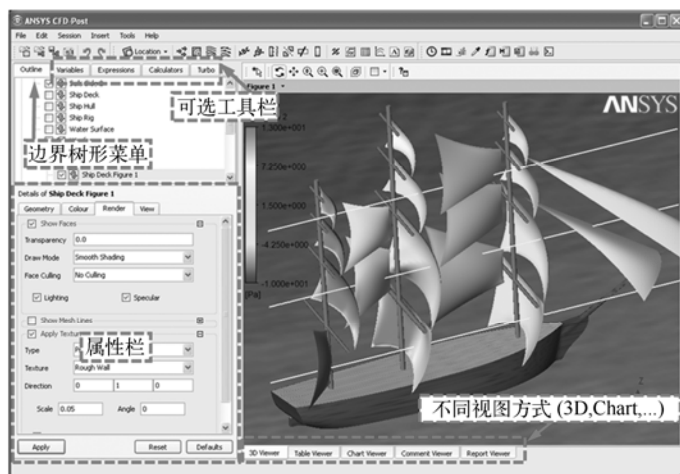


图 2-49　CFD-Post 的用户界面

2．CFD-Post 的一般流程

1）确定位置。域、子域、边界和网格区域都是位置。在这些位置上，可以抽取数据和产生各种图形。

2）如需要，可创建变量/表达式。

3）在位置上生成定量和定性的数据。

4）生成报告。

3．创建位置

1）在 Insert 菜单或工具栏中的 Location 项创建位置，如图 2-50 所示。

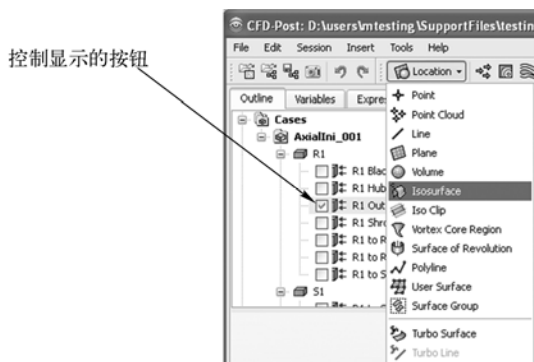


图 2-50　创建位置

2）创建好的位置显示在 Outline 树中。双击位置对象可以通过其属性栏进行编辑，右键单击该截面可以进行复制或删除。用户创建的位置都罗列在“User Locations and Plots”菜单下。

3）位置类型。

① 面（Planes）

如图 2-51 所示，可以通过“Method”项中“XY Plane”“Point and Normal”等方式创建面。在求解域里，可以创建圆或矩形。

② 点（Point）

如图 2-52 所示，可以通过 XYZ 方式（坐标系创建，通过鼠标拾取）、节点数（Node Number，一些求解器错误产生的节点数信息）、最大/最小变量（标明最大/最小变量出现的地方）等方式创建点。

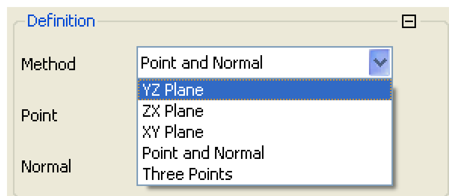


图 2-51　创建面的方式

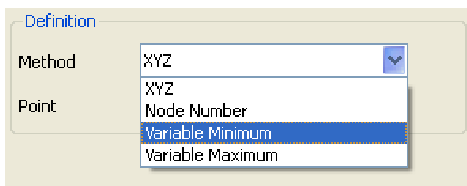


图 2-52　创建点的方式

③ 云（Point Cloud）

如图 2-53 所示，可以通过 Equally Spaced、Rectangular Grid、Vertex 等方式创建点云。

④ 线（Lines）

两点之间的直线，经常用于 XY 图表制作。

⑤ 体（Volumes）

可通过 Surface 构建，以选择的所有面构建而成，用于网格检查。

也可基于变量的等值体（Isovolume），如图 2-54 所示。

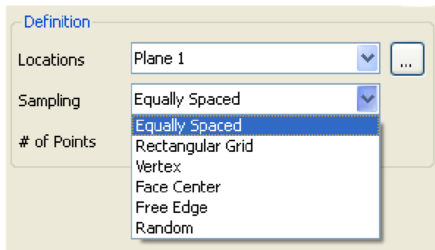


图 2-53　创建点云的方式

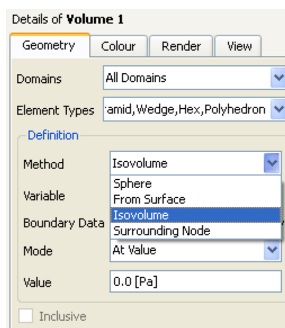


图 2-54　创建体的方式

⑥ 等值面

等值面指某指定变量的面。

此外还有涡核心区（Vortex Core Region）；旋转面（Surface of Revolution），其包括柱面（Cylinder），锥面（Cone），盘面（Disc）和球面（Sphere）等；用户自定义面（User Surface）等。

4．变量按钮

变量按钮显示所有可用变量的信息，如图 2-55 所示。

1）Derived variables：通过 CFD-Post 计算得到，这些量不包括在结果文件中。

2）Geometric variables：X，Y，Z，Normals，mesh quality data。

3）Solution variables：来自结果文件。

4）User Defined variables：创建新的变量，也可以用表达式代替变量。

在“Variables”页中，右键选择“Solution”>“New…”命令，可创建新的变量，如图 2-55 所示。

5．表达式按钮

Expressions 按钮显示全部存在的表达式，也可以在表达式上单击右键选择“New”命令，创建新的表达式，如图 2-56 所示。对新的表达式，在 Definition 下进行细节定义。

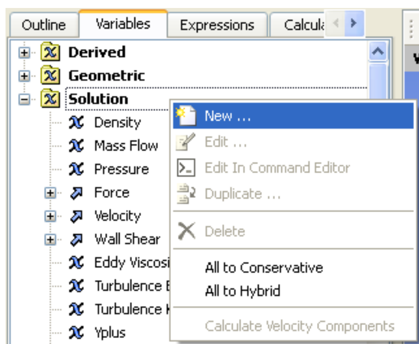


图 2-55 创建新的变量

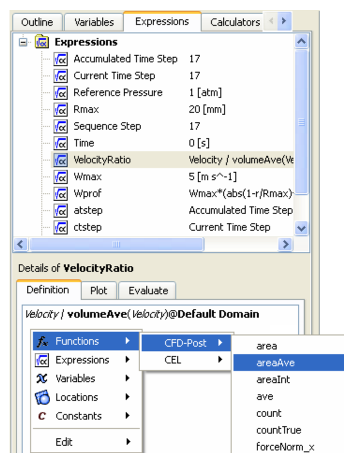


图 2-56 创建新的表达式

6．计算器按钮

计算器按钮主要包括以下工具，如图 2-57 所示。

（1）函数计算器 Function Calculator

用于抽取计算结果的工程数据，这些函数也可用于创建表达式，如图 2-58 所示。

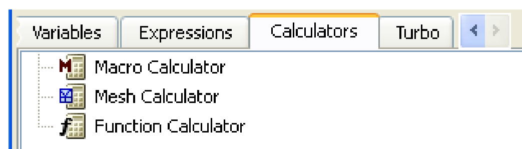


图 2-57 计算器按钮

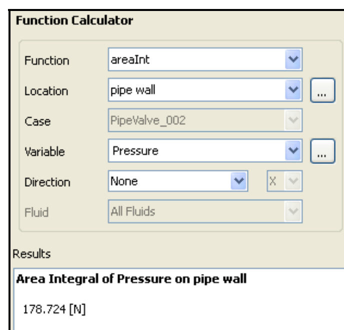


图 2-58 函数计算器

（2）宏计算器 Macro Calculator

用于计算预先定义好的宏，如图 2-59 所示。

（3）网格质量计算器 Mesh Calculator

用于计算网格质量，如图 2-60 所示。

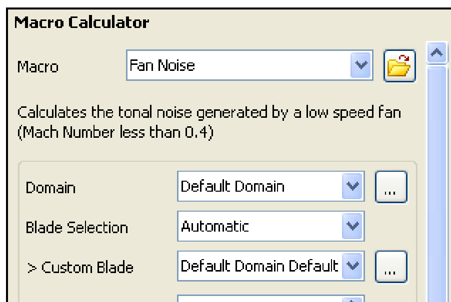


图 2-59　宏计算器

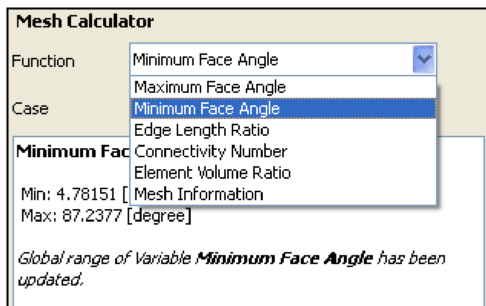


图 2-60　网格质量计算器

7．Turbo 按钮

Turbo 按钮包含透平机械计算的后处理工具，如图 2-61 所示。利用“Turbo”页，可以生成大量表格（Tables）和图表（Charts）。

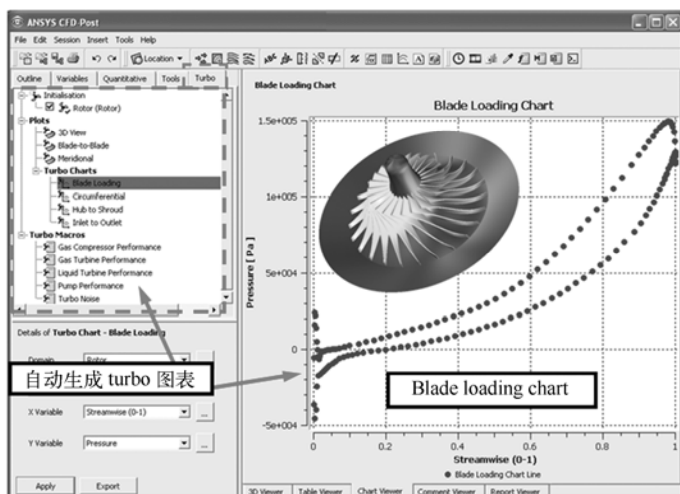


图 2-61　“Turbo”页

8．报告生成

CFD-Post 具有报告生成工具，允许通过定制报告的方式进行快速的报告生成。基于结果文件的类型，可以自动选择报告模板。

用户可以在 Report 选项上右键进行模板选择，也可以自己创建模板或修改已存在的模板，如图 2-62 所示。

比如加入公司的 logo，加入 Charts，Tables，Plots 等到报告中。

如图 2-63 所示，通过勾选方式，控制报告里显示的内容。各显示内容可通过双击的方

式进行编辑。

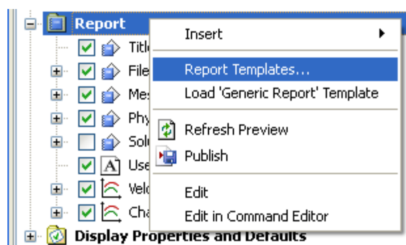


图 2-62　选择模板

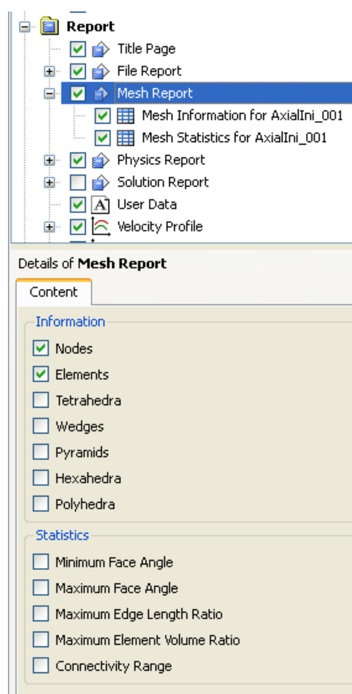


图 2-63　控制报告里显示的内容

如图 2-64 所示，Tables 和 Charts 可以自动加入到报告里，其他的项目需要通过手动的方法添加进去。

如图 2-65 所示，创建图片的时候， 有一个选项为：Make copies of objects。

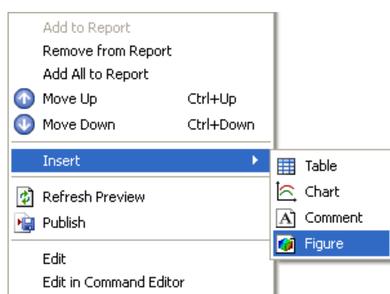


图 2-64　插入图表

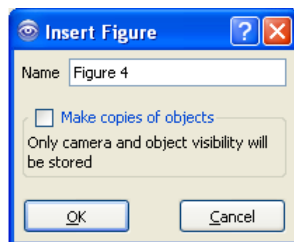


图 2-65　Make copies of objects 选项

这个选项没有勾选上，仅仅图片里显示的内容存储于 Figure 中。所以当全局目标改变，该图片也会发生改变，这用于需要图片自动更新的情况；如将该选项勾选上，图片里当前的内容存储在 Figure 中，并显示在目录树上。全局改变，不会导致 Figure 的改变。

报告的生成方法是：单击视图区右下角的“Report Viewer”按钮，显示 report 内容，如图 2-66 所示。

Report 的内容改变后，需要单击图 2-66 中左上角的“Refresh”按钮进行更新。

如图 2-67 所示，单击 Publish 按钮，将 Report 内容保存为 HTML 或 Text 格式，可以将所有 2D 图片显示为 3D 图片。

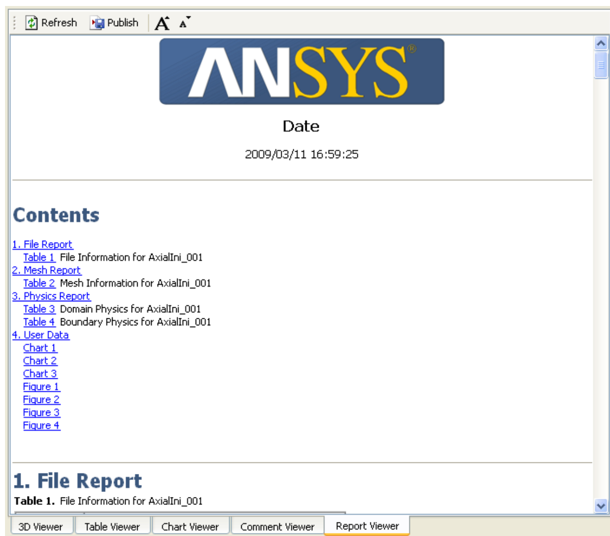


图 2-66 显示 report 内容

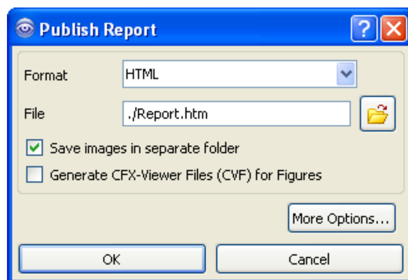


图 2-67 保存 report 内容

9．动画生成

创建动画有 Quick 和 Keyframe 两种模式，如图 2-68 所示。

在 Quick 动画模式下，仅需选取对象、单击“Play”键即可。主要的变量作为创建动画的对象，对动画效果控制有限。

Keyframe 模式对动画效果提供了大量的控制，如图 2-69 所示。其基本做法是：

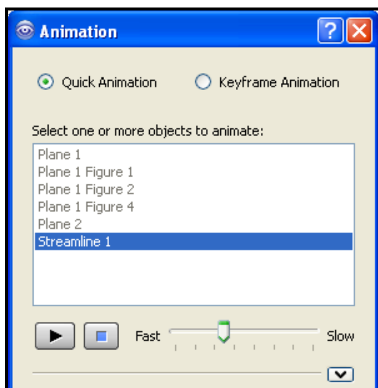


图 2-68 创建动画的两种模式

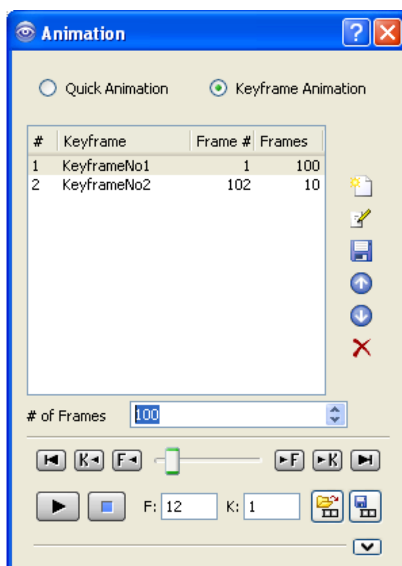


图 2-69 Keyframe 动画设置

1）创建一系列的影像存储于 Keyframes 中，代表一系列的不同状态（视图方向、显示的对象、时间步的选择等均可不一样）。

2）动画的创建至少需要两个 Keyframes (一个作为开始一个作为结束)。

3）每个 Keyframe 之间加入“# of Frames”数目。

典型的 Keyframe 动画帧设置方法为：

1）利用时间步选择器（Timestep Selector）调整到第一个时间步。

2）创建必要的显示对象。

3）创建第一个 Keyframe。

4）导入最后一个 timestep。

5）必要时，改变现实对象。

6）创建第二个 Keyframe。

7）选择第一个 Keyframe，并设置# of Frames。

8）# of Frames 指在第一个和第二个 Keyframes。

9）如果有 100 timesteps，设置# of Frames=98，将有 100 个 frames (98 +第一个和最后一个)，意味着 1frame/1timestep。

10）设置“Movie”选项。

11）回到第一个 Keyframe，并单击“Play”按钮。

2.5 FLUENT 软件在 Workbench 环境中的应用

启动 ANSYS Workbench，新建流体分析项目，在左侧项目树中将“Fluid Flow（FLUENT）”项拖至右侧项目栏空白区的方框中，如图 2-70 所示。

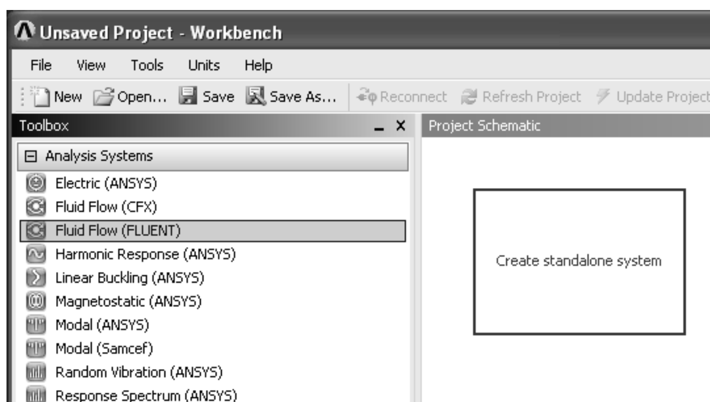


图 2-70　新建流体分析项目

项目栏中生成“Fluid Flow (FLUENT)”项目，如图 2-71 所示。

依次双击“Geometry”“Mesh”“Setup”“Solution”“Results”五个模块，可分别对计算模型进行模型处理、网格划分处理、计算条件设置、求解和计算结果后处理。

也可以采用对各个模块依次拖曳、连接的方法生成项目。

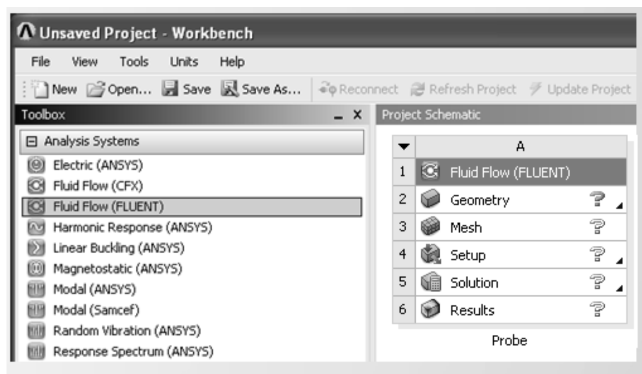


图 2-71　生成“Fluid Flow (FLUENT)”项目

2.6　用户自定义函数（UDF）

标准的 FLUENT 界面并不能满足每个用户的需要，而使用 UDF 可以定制 FLUENT 代码来满足用户的特殊需要。用户自定义函数（User Defined Function，UDF）是用户自编的程序，它可以被动态地连接到 FLUENT 求解器上来提高求解器性能。UDF 中可以使用标准 C 语言的库函数，或是 FLUENT 提供的预定义宏。通过预定义宏，可以实现从 FLUENT 求解中访问数据。编辑 UDF 代码有解释式（Interpreted UDF）和编译式 UDF（Compiled UDF）两种，即 UDF 使用时可以被当做解释函数或编译函数。

UDF 的主要功能包括：

1）定制边界条件；定义材料属性；定义表面和体积反应率；定义 FLUENT 输运方程中的源项；用户自定义标量输运方程（UDS）中的源项扩散率函数等。

2）在每次迭代的基础上调节计算值。

3）方案的初始化以及后处理功能的改善。

4）FLUENT 模型的改进（如离散项模型、多项混合物模型、离散发射辐射模型）。

UDF 可执行的任务主要包括：

1）返回值。

2）修改自变量。

3）修改 FLUENT 变量（不能作为自变量传递）。

4）写信息到（或读取信息从）case 或 data 文件。

UDF 是一个在 C 语言基础上扩展了 FLUENT 特定功能后的编程接口，用户可以借助 UDF 使用 C 语言编写扩展 FLUENT 的程序代码，然后动态加载到 FLUENT 环境中参与计算。在编写 UDF 时需要明确以下要求：

1）UDF 必须用 C 语言编写。

2）UDF 中必须包含 udf.h 头文件（可用#include 实现文件包含）。

3）UDF 必须使用预定义宏和包含在编译过程中的 FLUENT 提供的其他函数来定义。

4）由 UDF 传递给 FLUENT 求解器的参数值或从求解器返回到 UDF 的参数值，均采用

国际单位制。

UDF 程序可以在任何 C 语言编辑器中编写、调试，然后保存为扩展名为.c 的文件。在 UDF 程序中，其开头部分必须显式地包含 udf.h 文件，该文件存放在 FLUENT 的安装目录下，相关函数需通过 DEFINE 宏进行定义，例如：

DEFINE_PROFILE(Outlet_y_pressure，thread，index)

定义了一个名为 Outlet_y_pressure 的函数，thread 和 index 是由 FLUENT 传递给该函数的两个参数，分别表示边界条件区域的代号和用于识别被存储的变量。在将 UDF 加载到 FLUENT 中后，它的名称（Outlet_y_pressure）即出现在相应边界条件对话框（如压力出口对话框）中。



对 FLUENT 求解器的访问需要通过预定义宏进行。UDF 使用国际单位制向 FLUENT 传递数值。

应用 C 语言编辑器编写好 UDF 程序后，用户可以采用下列两种方法运行 UDF 程序：

1）应用 FLUENT 支持的外部 C 语言编译器对程序进行编译和链接。

2）直接作为解释型语言由 FLUENT 解释执行。

上述两种方式的程序结构和内容是基本一致的，唯一区别是可以调用的 C 语句不同，有些 C 语句在解释型程序中不能使用，例如，goto 语句。编译型的 UDF 程序比解释型的 UDF 功能要强大，但其占用的内存资源较多。解释型的程序也可以完全用来编译。一般来说，使用解释型的 UDF 程序就足够了。

作为示例，下面给出了应用 DEFINE_PROFILE 宏来定义的为求解器提供边界信息的代码：

```
/****************************************************/
/* udfexam.c */
/* UDF 程序——制定稳态压力进口边界条件 */
/****************************************************/
#include “udf.h”
DEFINE_PROFILE(inlet_y_totalpressure， thread， index)
{
  real y[NP_NP]; /* 对应于位置矢量，real 相当于 double */
  real x;
  face_t f;
  begin_f_loop(f，thread) /*针对由 thread 所传入的所有单元面循环*/
  {
    F_CENTROID(y，f，thread);
    x=y[1];
    F_PROFILE(f，thread，index)=20−y*y/(0.0745*0.0745)*20;
  }
  end_f_loop(f，thread)
}
```

在 DEFINE_PROFILE 宏的第一个参数 inlet_y_totalpressure，用来标识 Pressure inlet 对话框中的函数，该名称可由用户任意指定。

将所编辑的 UDF 源程序在 FLUENT 中进行运行，需要遵循以下基本步骤：

1）明确所求解的问题。

2）编写基于 C 程序语言的 UDF 源代码。

3）运行 FLUENT，读入并设置文件。

4）将 UDF 源代码加载进解释器进行解释。

5）关联 UDF 与 FLUENT。

6）求解计算。

7）对计算结果进行分析，与期望值进行比较。

2.7 前处理软件介绍

2.7.1 ICEM CFD 软件基本功能介绍

ICEM CFD 原是美国 ICEM Technologies 公司的产品，于 1990 年问世，2000 年被 ANSYS 公司收购。高度智能化的 ICEM CFD 软件拥有强大的 CAD 模型修复能力、自动中面抽取、独特的网格“雕塑”技术、网格编辑技术以及广泛的求解器支持能力，可生成块结构化网格、非结构化网格（三角形、四面体、六面体），适体坐标以及 H 型自适应网格。ICEM CFD 能为所有的 CAE 软件提供高效、可靠的分析模型，同一套网格可以输出到 STAR-CCM+、Ansys/Flotran、Phoenics、Fluent、CFX、Numeca、CFD++等求解器进行计算，以比较各求解器对不同模型计算分析能力上的优缺点。ICEM CFD 集成于 ANSYS Workbench 环境中后，获得了 Workbench 的所有优势，为 CFD/CAE 计算提供了更为方便的前处理能力。

ANSYS ICEM 在网格剖分方面提出“雕塑”的概念：任意复杂的几何体总可以在区域上划分为多个块体（block）的组合。使用者只需对块体划分网格，然后投射到复杂表面上。所有的网格形态在没划分前就已确定，而不像其他软件采用的“堆砌法”，网格在没“堆砌”完成之前无法确定网格形态。ICEM 还可以读写世界所有知名 CAE/CFD/CEM 软件的网格格式。航空、航天、船舶行业的企业和研究所通常拥有多种 CAE/CFD/CEM，ICEM 技术为这类企业提供了统一的网格解决方案，省去使用者在多种软件之间切换的苦恼。

ICEM CFD 的主要功能包括：

1）导入各种主流 CAD 软件（CATIA、UG、Creo、SolidWorks、IDEAS 等）格式的几何模型文件，并提取文件中的曲面、曲线和点，整理和增添几何造型。

2）简单的 CAD 功能，可修复导入过程中引起的面缺失等几何特征缺失或表达错误的问题，但不适于直接建立复杂模型。

3）生成四面体、六面体、三棱柱、金字塔四种类型的网格。

4）网格质量检查功能，通过查看网格质量分布，帮助使用者发现质量较差的网格并及时修整。

5）边界层网格自动加密，流场变化剧烈区域网格局部加密。

6）自动光顺网格，改善网格质量。

7）手动修改网格。

8）将网格导出成一百多种专用和通用格式。

ICEM CFD 提供的网格生成工具包括：

1）ICEM Hexa——六面体网格。

2）ICEM Tetra——四面体网格。

3）ICEM Prism——棱柱体网格（边界层网格）。

4）ICEM Hybrid——四面体、六面体网混合格。

5）ICEM BF-Cart——笛卡儿边界自适应网格。

6）ICEM Global——自动笛卡儿网格生成器。

7）ICEM Quad——表面网格。



ICEM CFD 的几何模型工具具有方便的模型清理功能，能对建模过程中形成的不完整曲面进行合理的清理。此外，ICEM CFD 的网格生成工具还可集成在 CAD 环境中。用户可在自己的 CAD 系统中进行 ICEM CFD 的网格划分设置，如在 CAD 中选择面、线并分配网格大小属性等，这些数据可存储在 CAD 的原始数据库中，用户在对几何模型进行修改时也不会丢失相关的 ICEM CFD 设定信息。

常用工具的命令及对应操作如表 2-1 所示。

表 2-1 常用工具的命令及对应操作

常用工具分类	按钮图标	命令	对应操作
几何操作工具（Geometry）		Create Point	创建点
		Create/Modify Point	创建/修改线
		Create/Modify Surface	创建/修改面
		Create Body	创建体
		Create Faceted	创建小面
		Repair Geometry	修补几何体
		Transform Geometry	平移几何体
		Restore Dormant Entities	重载隐藏实体
		Delete Point	删除点
		Delete Curve	删除线
		Delete Surface	删除面
		Delete Body	删除体
		Delete Any Entity	删除所有实体
网格划分工具（Mesh）		Global Mesh Setup	全局网格设置
		Part Mesh Setup	部件网格设置
		Surface Mesh Setup	面网格设置

（续）

常用工具分类	按 钮 图 标	命　　令	对 应 操 作
网格划分工具（Mesh）		Curve Mesh Setup	曲线网格设置
		Create Mesh Density	设置网格密度
		Define Connectors	定义连接
		Mesh Curve	曲线网格划分
		Compute Mesh	划分网格
拓扑划分工具（Blocking）		Create Block	创建块
		Split Block	划分块
		Merge Vertices	合并顶点
		Edit Block	编辑块
		Associate	关联
		Move Vertex	移动顶点
		Transform Blocks	变换块
		Edit Edge	编辑边
		Pre-Mesh Params	设置网格参数
		Pre-Mesh Quality Histograms	检查网格质量
		Pre-Mesh Smooth	光顺网格
		Block Checks	检查块
		Delete Block	删除块
网格输出工具（Output）		Select Solver	设置求解器
		Boundary Conditions	边界条件
		Edit Parameters	编辑参数
		Write Input	输出网格

以上工具的具体用途详见本书其余章的实例讲解。

2.7.2 GAMBIT 软件基本功能介绍

1. GAMBIT 的基本功能

GAMBIT 是早期 FLUENT 软件自带的前处理软件，可提供 FLUENT 软件和其他多种软件所需的网格模型。GAMBIT 的基本功能主要包括以下 3 种。

（1）构建模型

GAMBIT 本身提供几何建模功能，只要模型不太复杂，一般可以直接在 GAMBIT 中完成几何建模。对于复杂的 CFD 模型，GAMBIT 一般借助专用的 CAD/CAE 软件进行几何建模，再导入软件中进行网格划分。GAMBIT 支持导入的几何模型文件的类型包括 ACIS、Parasolid、Iges 和 Stp 等格式。

（2）划分网格

GAMBIT 拥有完全非结构化的网格划分能力，能够针对复杂的几何外形生成三维四面体、六面体的非结构化网格及混合网格，且有数十种网格生成方法。GAMBIT 还提供了对复杂几何模型生成边界层网格的重要功能，边界层内的贴体网格能很好地与主流区域的网格自动衔接，大大提高了网格的质量。GAMBIT 拥有多种方便简捷的网格检查技术，用户能快捷地检查已生成网格的质量并进行光顺优化。

（3）指定边界

网格生成之后，用户可在 GAMBIT 指定边界，为后续进行 CFD 模拟时设置边界条件奠定基础。

综上所述，GAMBIT 软件生成 CFD 网格文件需要经过构造几何模型、划分网格、指定边界类型和区域类型三大步骤。

由于 FLUENT 6.3 及之前的版本均采用了 GAMBIT 软件，且入门和使用均较为方便，目前仍拥有一定量的用户。

2．体网格的生成方法

如图 2-72 所示，首先选择一个体，GAMBIT 根据所选择的求解器和体上的面结合类型自动的选择一种网格划分方式。可用的网格类型（见图 2-73）及其适合的方法包括：

1）Hex（六面体网格）：Map，Submap，Tet Primitive，Cooper。

2）Hex/Wedge：Cooper。

3）Tet/Hybrid：TGrid，HexCore。

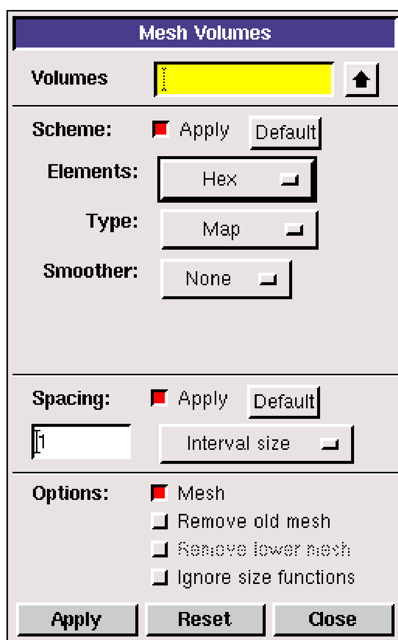


图 2-72　体网格划分对话框

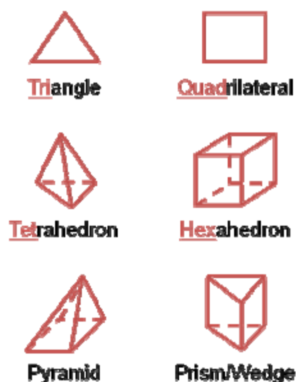


图 2-73　不同的网格形状

单击按钮，定义边界类型的对话框如图 2-74 所示。

单击按钮，定义域类型的对话框如图 2-75 所示。域类型与边界类型的定义方式类似，用户可以定义多个流体域或固体域。一般未定义的区域被指定为 fluid 类型。

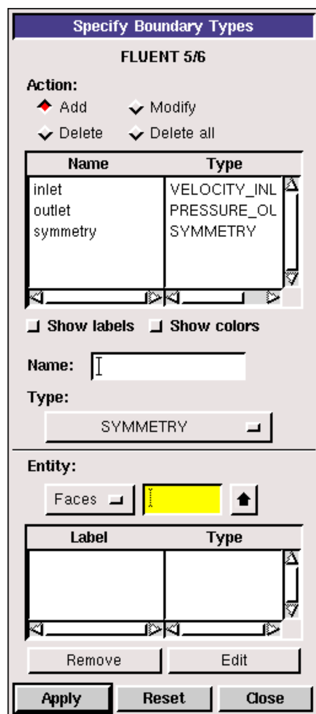


图 2-74　指定边界类型

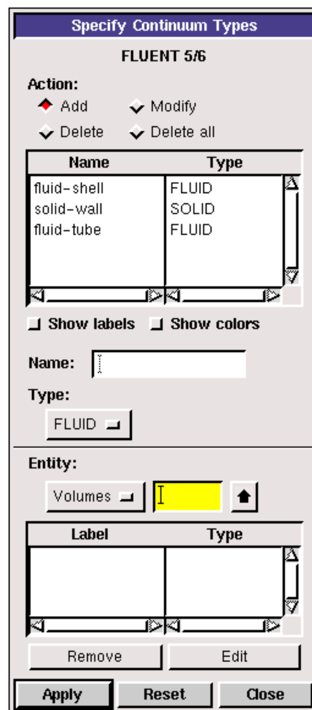


图 2-75　指定连续体

第 3 章 排气管道传热系数与辐射计算

本章主要内容：

本章为某排气管内外壁面换热计算的案例，通过各部分模型创建、块结构化网格划分、各部分网格组合、计算模型设置、求解及计算结果后处理等各流程的讲解，让读者熟悉管壁结构换热计算的原理、相关设置、求解方法及技巧。

本章学习目标：

✧ ICEM-CFD 创建模型。
✧ ICEM-CFD 结构化网格划分方法及流程。
✧ FLUENT 软件进行传热计算的设置流程及求解方法。
✧ FLUENT 软件进行管内辐射传热的设置流程及求解方法。
✧ CFD-Post 计算结果后处理方法。

为了计算排气道表面的 K 值分布及管内辐射，建立了排气道的模型。考虑了排气道法兰及隔热层等结构，忽略了螺栓等小部件的影响。该模型考虑了排气道壁面与内部气流的流固传热。流体与固体及固体与固体之间采用 interface 进行连接。

图 3-1 所示为排气道的简化模型，图中对法兰处进行了简化，将波纹管完全考虑为钢管（8mm）结构，其余部分完全按照排气道的真实模型建立。

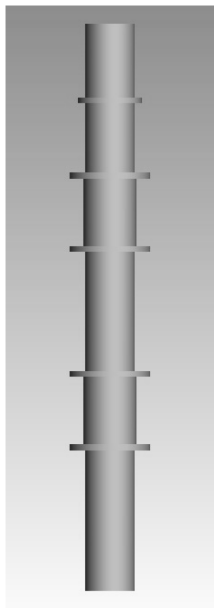


图 3-1 传热管计算模型

计算边界条件及对应物质的材料属性：排气道内部流体区域进口为速度入口，空气流速为 63m/s，空气温度为 803K，出口为压力出口，管道为钢结构，导热系数为 34.8W/(m·K)，隔热层导热系数为 0.02W/(m·K)。

3.1 传热管模型的创建

传热管模型分为四部分，分别为内部流体区域、传热管壁的固体区域、法兰及波纹管区域。

内部流体区域为直径为 200mm，长为 2350mm 的圆柱体。创建模型的顺序依次为点、线面。

1）通过开始菜单启动 ICEM-CFD 软件，如图 3-2 所示。



图 3-2　启动 ICEM-CFD 软件

2）创建点。在功能菜单中选择“Geometry”>“Create Point”命令，在左侧出现创建点的工具栏，如图 3-3 所示。选择根据坐标创建点 Explicit Coordinates，在下方的坐标栏中输入欲创建点的坐标，单击“Apply”按钮后即生成点，如图 3-4 所示。创建点的坐标分别为 (0,0,0)，(0,0,100)，(0,0,−100)，(100,0,0,)，(−100,0,0)，(0,2350,100)，(0,2350,−100)，(100,2350,0,)，(−100,2350,0)。

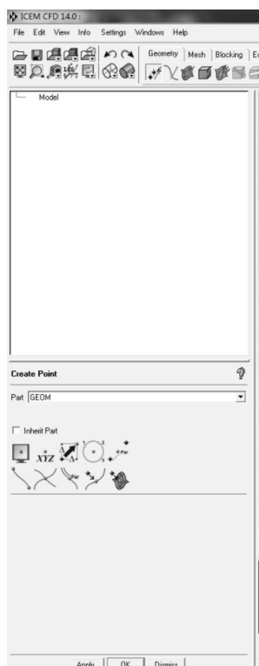


图 3-3 创建点

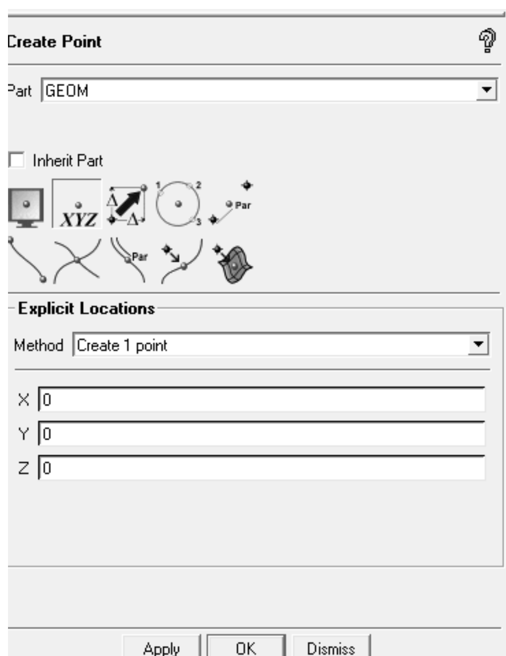


图 3-4 由坐标创建点

3）由点生成线。在功能菜单中选择“Geometry”>“Create Modify Curve”命令，在左侧出现创建线的工具栏中选择“From Points”，将上一步创建的点连接成线，如图 3-5 所示。

4）由线生成面。在功能菜单中选择“Geometry”>“Create Modify Surface”命令，在左侧出现相应的工具栏中选择“Simple Surface”，利用上一步创建的线生成面。

创建好的模型如图 3-6 所示。



图 3-5 由点生成直线



图 3-6 流体域模型



3.2 网格划分

基于块的结构化网格，首先要创建流体域，然后生成块，最后在块中划分网格。

（1）创建流体域

在菜单中选择“Geometry”>“Create Body”（即项），在工具栏中选择“Material Point”，在“Part”选项中输入流体域的名称，选择模型中的两个点，确认后生成流体域，如图 3-7 所示。

（2）生成块

在上一步创建好的流体域上生成块。选择菜单工具栏中的“Block”，在左侧工具栏中选择“Create Block”，同时选择“Initialize Blocks”，在下方选择“Initialize with settings”，确认后即可生成块，如图 3-8 和图 3-9 所示。

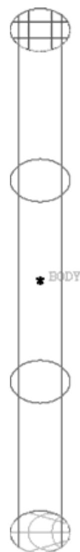


图 3-7　生成流体域

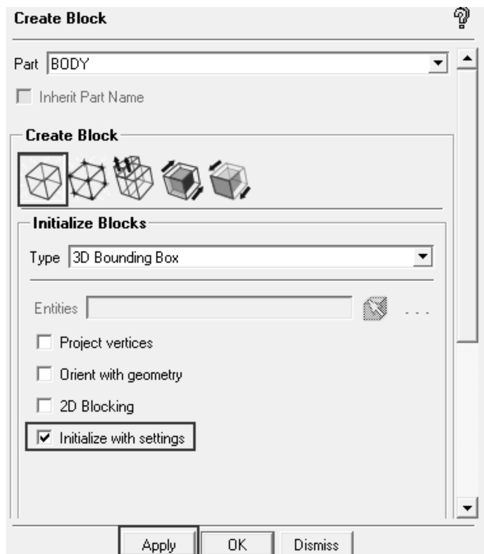


图 3-8　生成块的工具栏

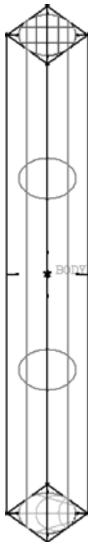


图 3-9　生成的块

（3）生成 O 型网格块

划分好块后首先进行块的分割，在菜单栏中选择“Blocking”>“Split Block”，在左侧的工具栏中选择“O grid Block”>“Select Block”命令，在下方选择“Select Surface”，选取模型中的“块”，确认后如图 3-10 所示。

应用后的 O 型网格块如图 3-11 所示。

（4）建立拓扑关系

生成结构化网格的关键点在于建立拓扑关系，首先建立点的拓扑关系，其次建立线的拓扑关系。

路径为在菜单栏中选择“Blocking”>“Associate”命令，在左侧“Edit Associations”工具栏中选择“Associate Vertex”，分别选取模型中块的节点与创建的点，确认后即建立点的拓扑关系。

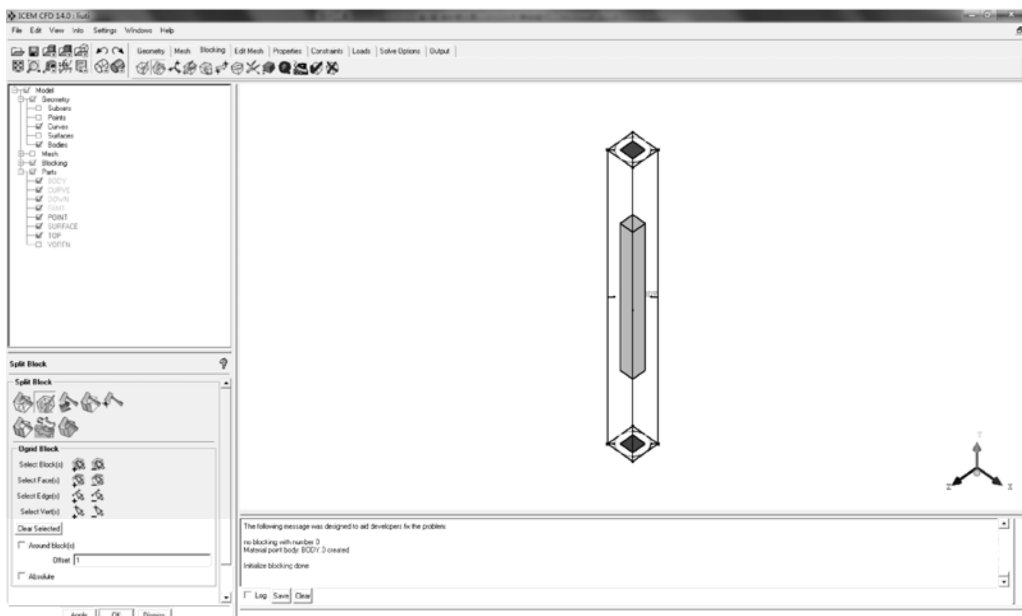


图 3-10　划分 O-grid

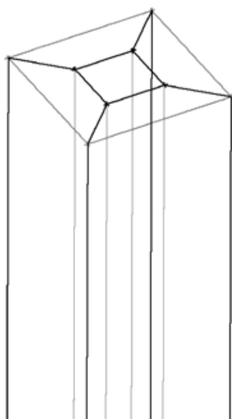


图 3-11　O 型网格块示意图

选取“Associate Edge to Curve”，分别选取欲建立拓扑关系的 edge 和 curve，确认后即建立线的拓扑关系。建立拓扑关系的线变为绿色，如图 3-12 所示。

欲查看所创建的拓扑关系，可以在左侧模型树中选择“Blocking”>“edges”命令，右键选择“Show Association”，随后在模型中以“箭头”的形式显示出拓扑关系，如图 3-12 所示。

（5）设定网格尺寸

选择菜单栏“Blocking”>“Pre-Mesh Params”命令，如图 3-13 所示，进行网格尺寸的设定。

在左侧工具栏中选择“Edge Params”，在模型中选取“edge”，设定其节点数、网格变化法则以及第一个网格大小及变化率等，如图 3-14 所示。

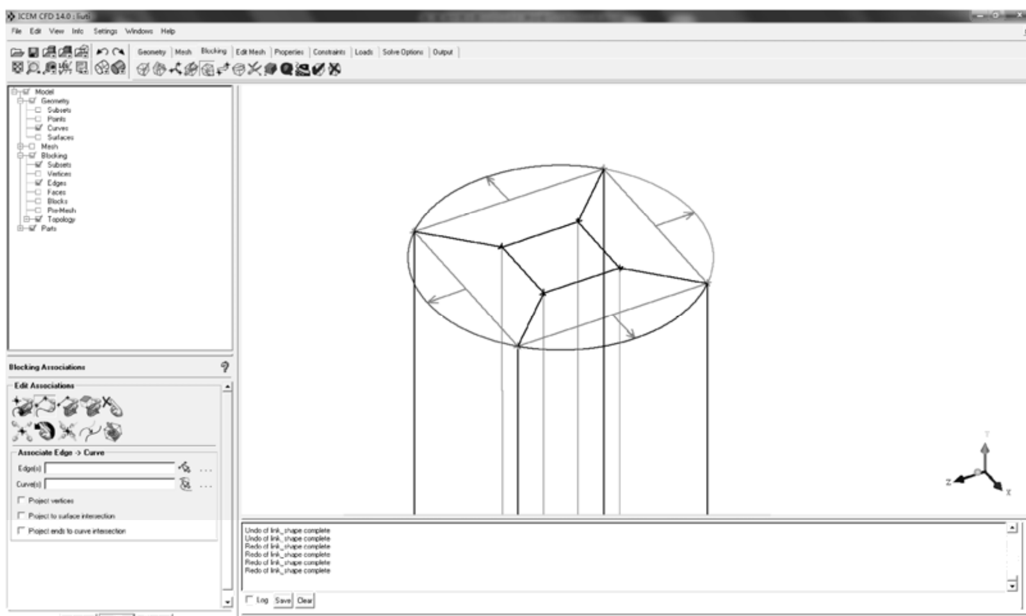


图 3-12　建立拓扑关系的点和线

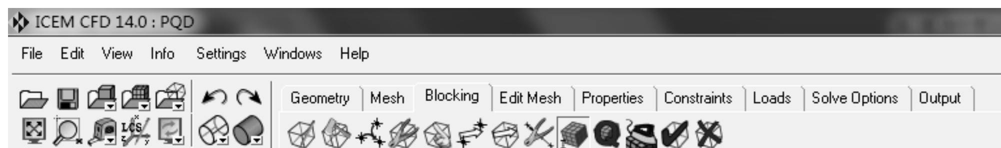


图 3-13　选择设定网格路径

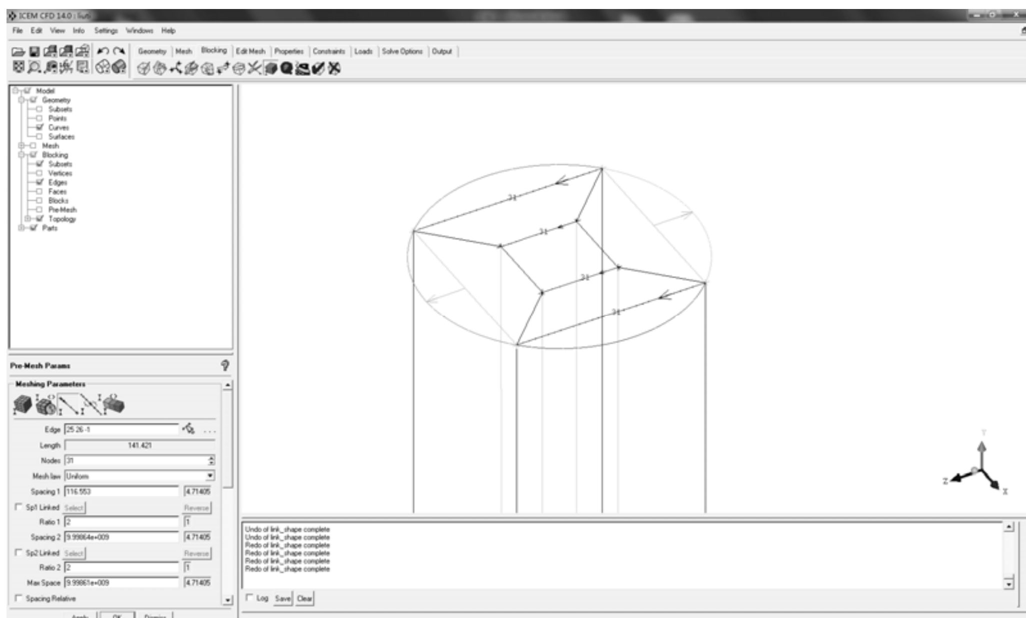


图 3-14　设定网格尺寸

按照此方式将每个 edge 均设置网格尺寸，随后在模型树中选择“Blocking”>“Pre-Mesh”选项，划好的网格如图 3-15 所示。为保证计算精度，最外层管壁至少有三层网格，本例中设定了五层网格。

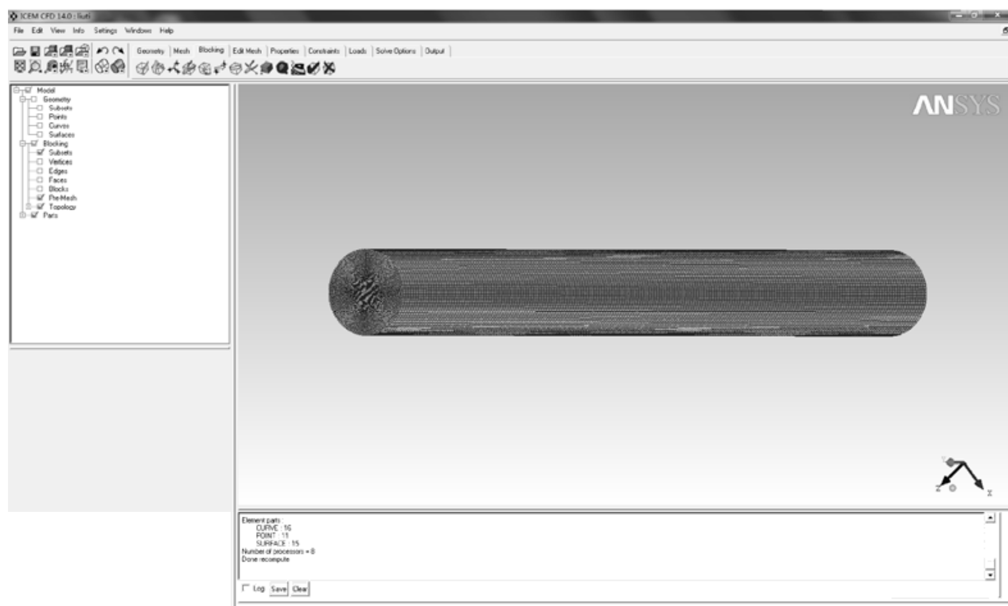


图 3-15　划分好的网格

（6）检查网格质量

划分网格后要检查网格质量，以保证在计算软件中可以顺利地进行计算。检查的项目主要有内角（Angle）、纵横比（Aspect ratio）、行列式（Determinant3×3×3）、扭曲(Distortion)、总体质量（Quality）。经检查，各部分网格质量均较高，如图 3-16～图 3-20 所示。

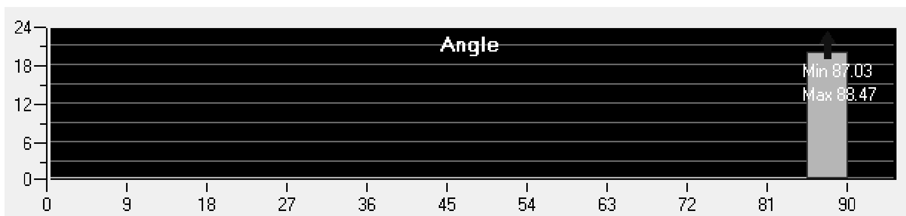


图 3-16　内角（Angle）检查结果

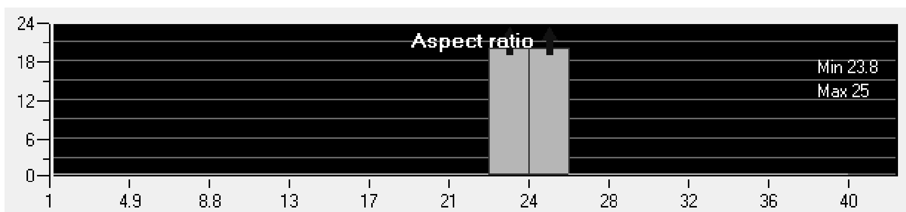


图 3-17　纵横比（Aspect ratio）检查结果

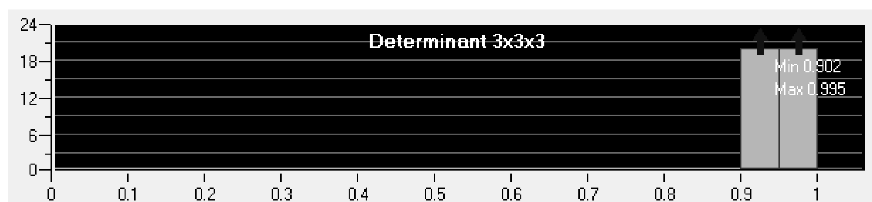


图 3-18　行列式（Determinant3×3×3）检查结果

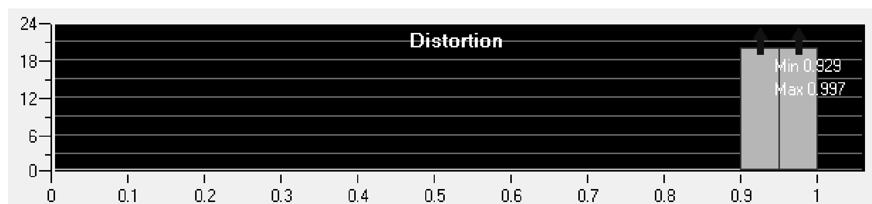


图 3-19　扭曲（Distortion）

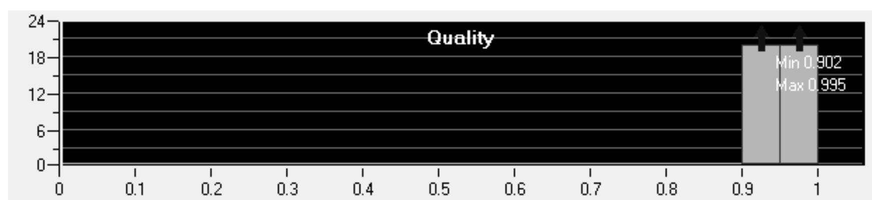


图 3-20　总体质量（Quality）

（7）按照上述方法将管道及法兰部分进行模型的创建和网格划分
划分好的管道和法兰部分如图 3-21 和图 3-22 所示。

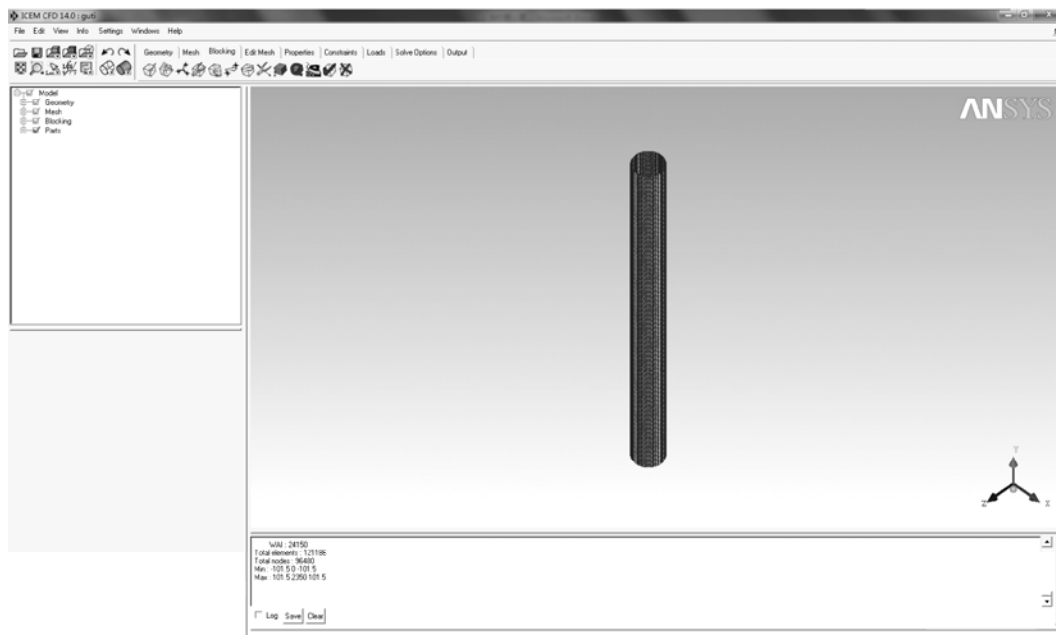


图 3-21　管道

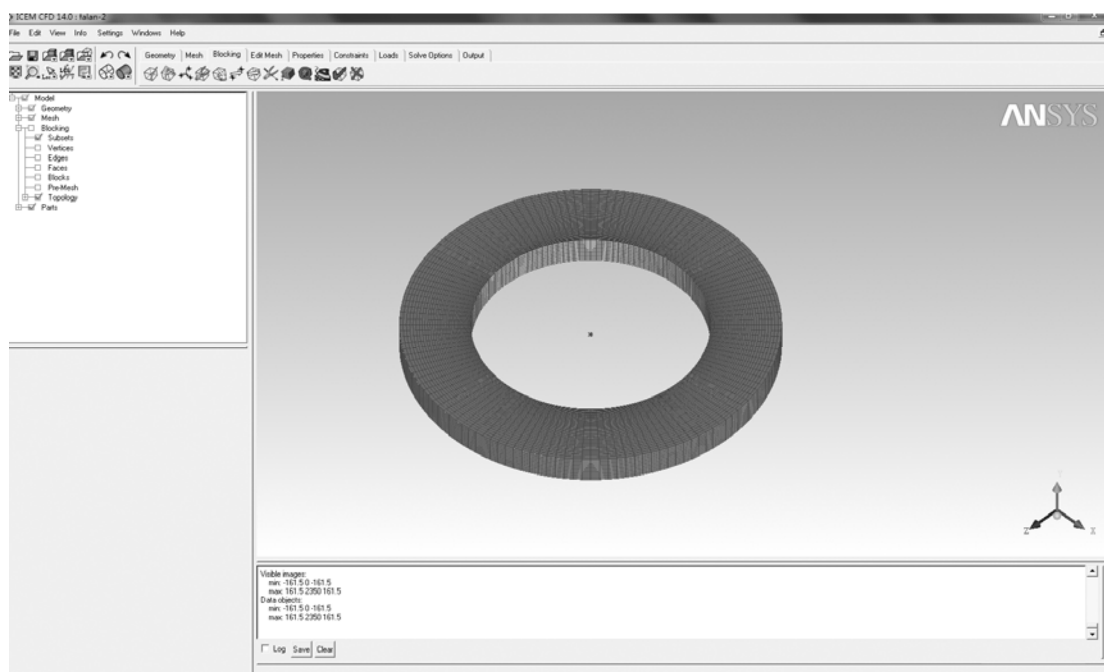


图 3-22　法兰

（8）将各部分网格进行组合

其中模型的组合实际上是各部分网格文件的组合，选择“File”>“Mesh”>“Open Mesh”命令，在弹出的网格文件中选择各部分的网格，打开后弹出网格提示对话框，如图 3-23 所示，选择“Merge”后网格文件即导入当前模型中。全部网格文件导入组合后的传热管模型如图 3-24 所示。



图 3-23　网格组合提示框

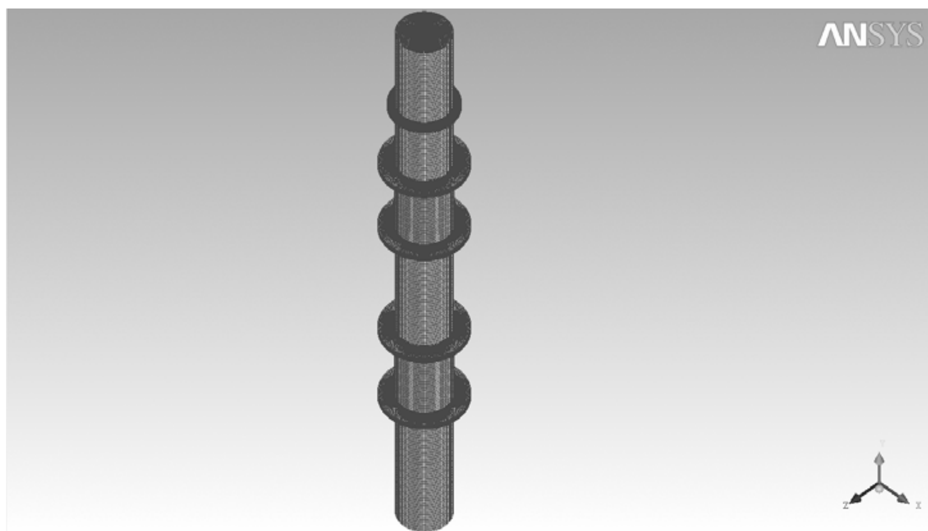


图 3-24　传热管模型

（9）网格的合并

组合后的网格由于同一交界面有两层网格且网格节点不对应，因此需要进行网格的合并。选择菜单栏中的“Edit Mesh”>“Merge Nodes”命令，弹出图 3-25 所示的“Merge Nodes”面板，选择“Merge Meshes”，在下方“Method”选项中选择“Merge volume meshes”，单击“Merge surface mesh parts”旁边的按钮，在弹出的选择框中勾选需要合并的面，单击“Accept”按钮确认，单击“Apply”按钮确认合并节点。

组合后的网格还要进行整体网格质量的检查，检查结果如图 3-26～图 3-30 所示。

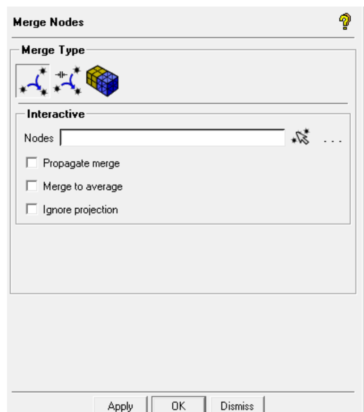


图 3-25　合并几点面板

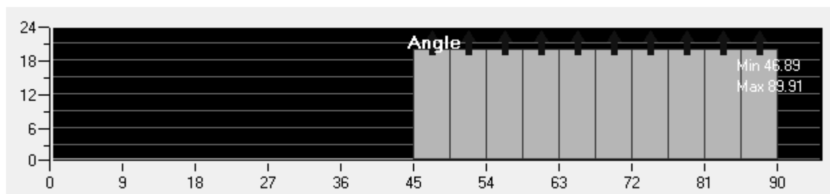


图 3-26　内角（Angle）检查结果

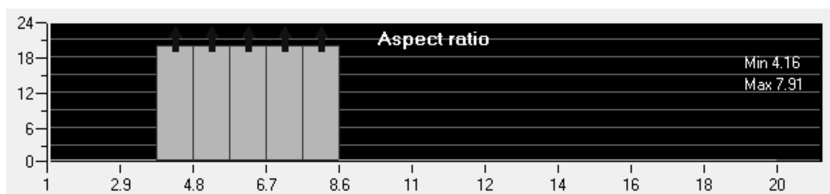


图 3-27　纵横比（Aspect ratio）检查结果

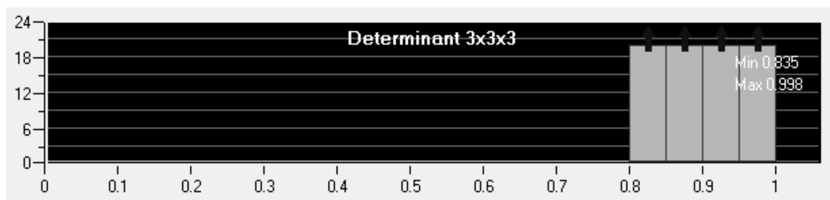


图 3-28　行列式（Determinant3×3×3）检查结果

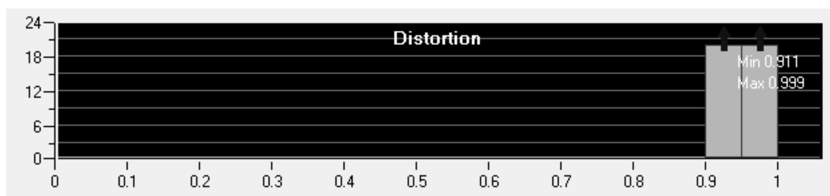


图 3-29　扭曲（Distortion）



图 3-30 总体质量（Quality）

（10）导出网格

至此，模型的前处理已经完成，需要将其导出，通过 Fluent 软件进行计算。在菜单栏中选择“Output”>“Select solver”，工具栏中弹出“Solver Setup”选项栏，在“Output Solver”下选择“ANSYS Fluent”，其余选择默认，如图 3-31 所示。

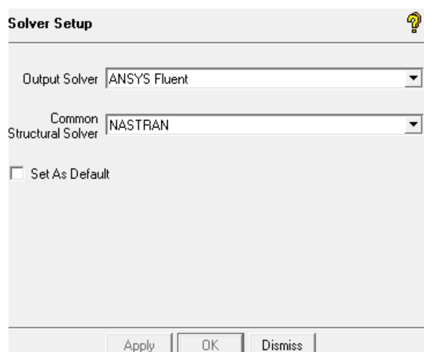


图 3-31 Solver Setup 选项框

选择菜单栏下的“Output”>“Boundary conditions”，弹出“Family boundary conditions”提示框，进行边界条件的导出设置。设置好速度入口与压力出口的边界条件，如图 3-32 所示。

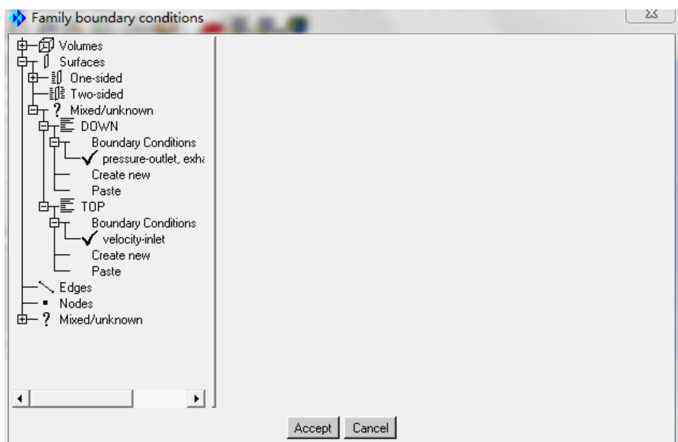


图 3-32 边界条件设置

设置完导出对象与边界条件后将其导出。选择“Output”>“Write input”命令，弹出“Save”对话框，如图 3-33 所示。



图 3-33 “Save”对话框

单击“Yes”按钮确认后弹出“打开”网格文件的对话框，选择相应的网格文件，如图 3-34 所示。

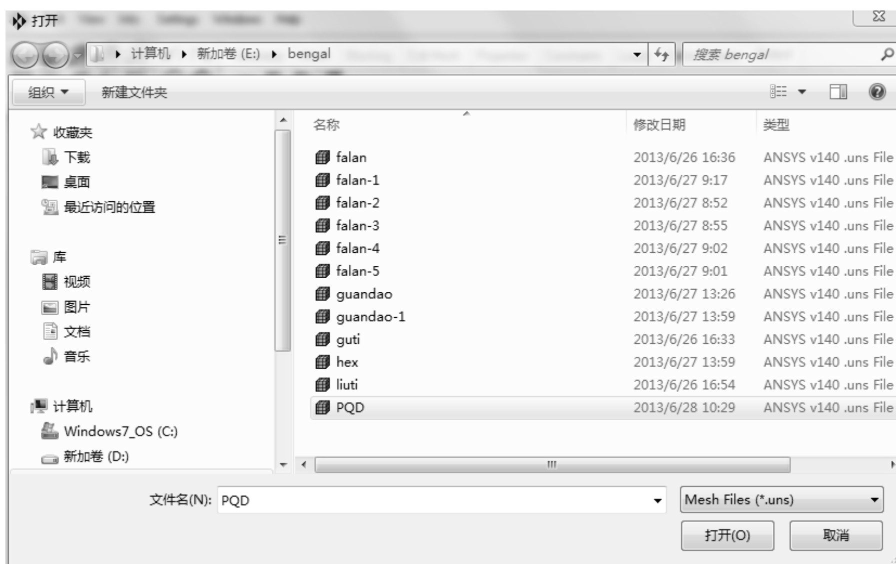


图 3-34 “打开”对话框

单击“打开”按钮，弹出“ANSYS Fluent”对话框，如图 3-35 所示。

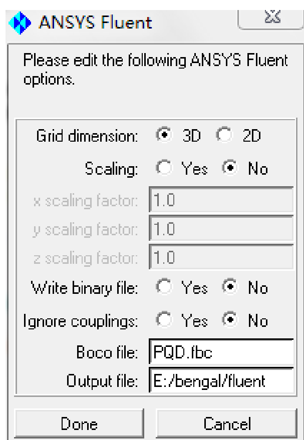


图 3-35 “ANSYS Fluent”对话框

3.3 K 值计算设置与处理

3.3.1 导入网格文件

1）启动 FLUENT 软件。选择“开始”命令，打开 FLUENT 软件启动界面，如图 3-36 所示。单击“OK”按钮后进入 FLUENT 软件。

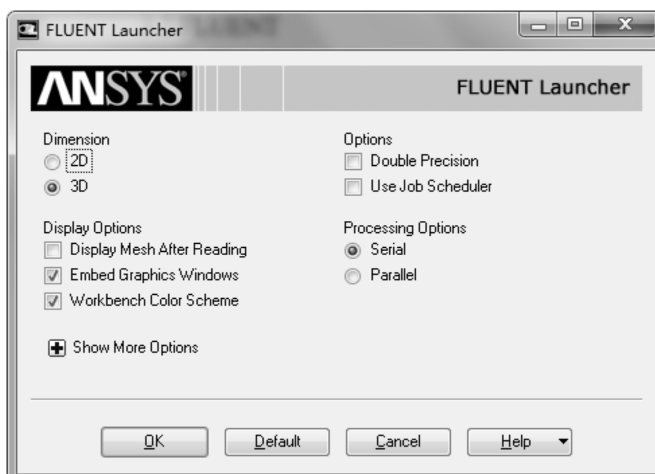


图 3-36　启动 FLUENT 软件

2）导入网格文件。选择“File”>“Read”>“Mesh...”菜单命令，导入网格，如图 3-37 所示。

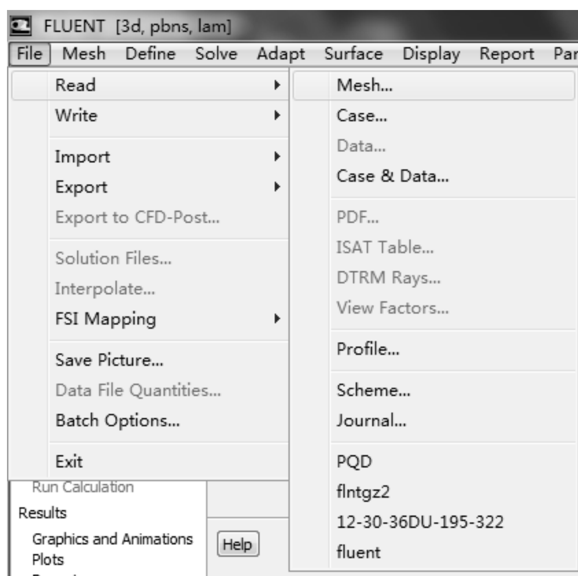


图 3-37　导入网格

弹出“Select File”对话框，选择“PQD.msh”，单击“OK”按钮打开该网格文件，如图 3-38 所示。

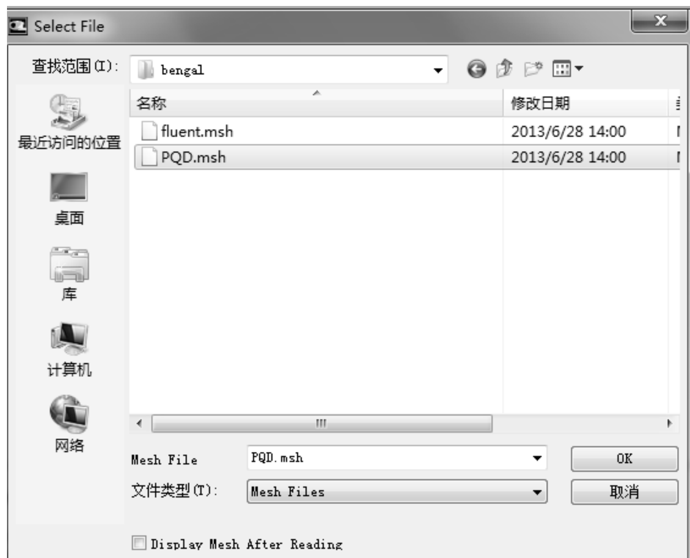


图 3-38　导入网格文件

3）显示网格。选择“Display”>“Mesh...”菜单命令，打开“Mesh Display”对话框。如图 3-39 所示，单击“Mesh Display”对话框中的“Display”按钮，视图区出现计算模型的网格，单击“Close”按钮退出。

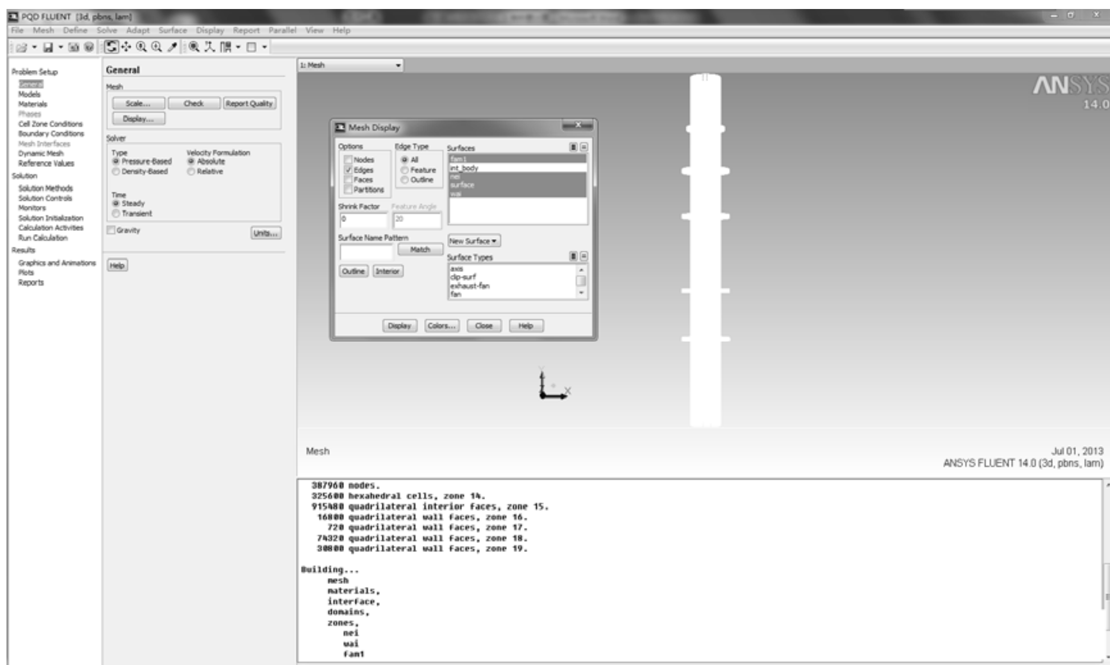


图 3-39　显示网格

4）缩放模型比例。单击左侧项目树“Problem Setup”>“General”项属性栏中的“Scale...”按钮，弹出图 3-40 所示的“Scale Mesh”对话框。

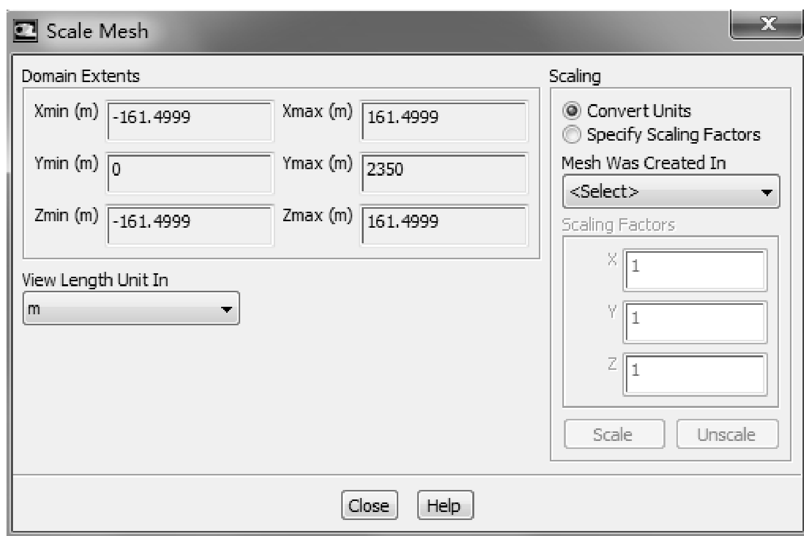


图 3-40　“Scale Mesh”对话框

FLUENT 读入网格文件后，所有的维度默认是以“m”为单位的，而 ICEM 软件划分网格是采用“mm”为单位的，因此需要对网格进行缩放。

选择缩放单位。将对话框右侧的“Mesh Was Created In”项设置为“mm”，“Scaling Factors”下的各项值则相应地由“1”改变为“0.001”；“View Length Unit In”项设置为“mm”，单击“Scale”按钮，坐标范围变换为图 3-41 所示的形式。单击“Close”按钮退出。

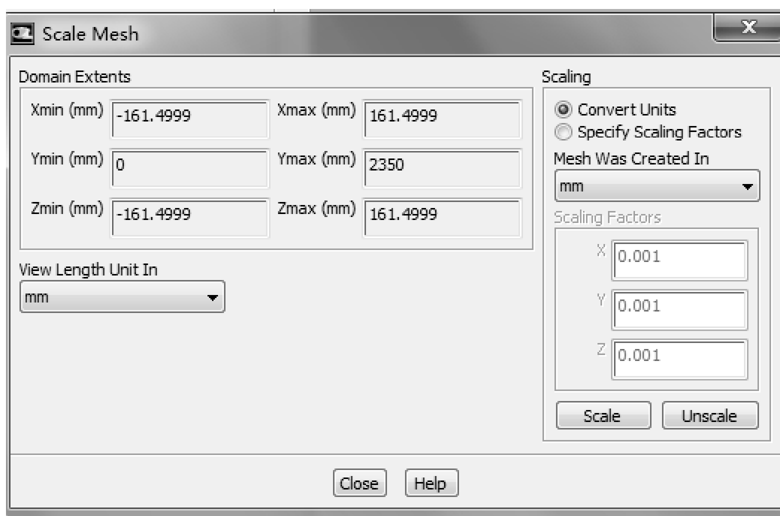


图 3-41　缩放后的模型尺寸示意图

3.3.2 设置计算模型

1）默认选择“Problem Setup”>“General”项属性栏中的各项设置。

2）设置模型。

选择“Problem Setup”>“Models”菜单命令，双击其属性栏中的“Energy-off”项，在弹出的“Energy”框中将“能量方程”勾选，单击“OK”按钮即可。

湍流模型的设置，双击“Viscous-Laminar”项，弹出“Viscous Model”对话框，如图 3-42 所示。

选择“k-epsilon”湍流模型后，展开其对应的选项框，如图 3-43 所示，默认设置即可，单击“OK”按钮完成此项设置。

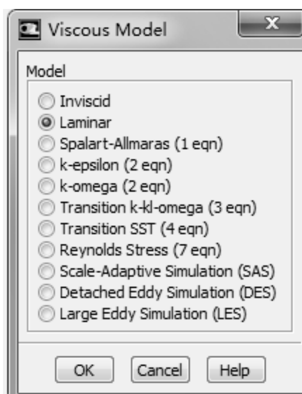
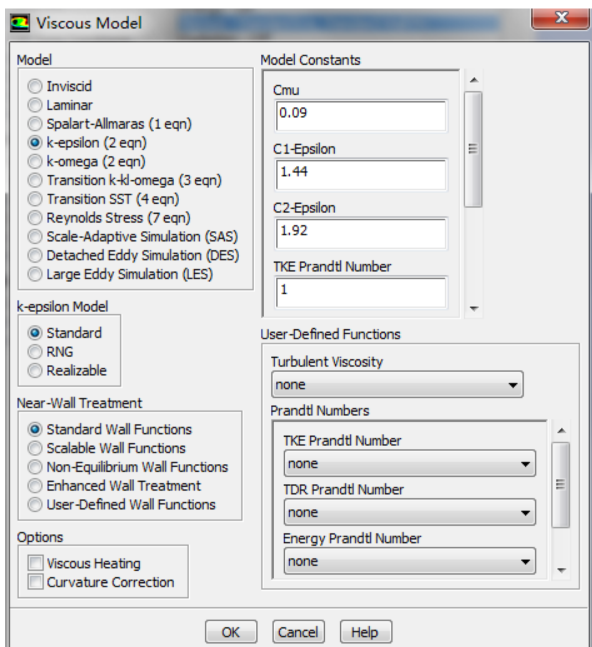


图 3-42　湍流模型选择框

3）保持“Problem Setup”>“Materials”和“Problem Setup”>“Cell Zone Conditions”两项属性栏设置不变。

4）操作环境设置。

选择菜单栏中的“Define”>“Operating Conditions”命令，弹出图 3-44 所示的对话框，本例保持系统默认设置即可满足要求，直接单击“OK”按钮退出。



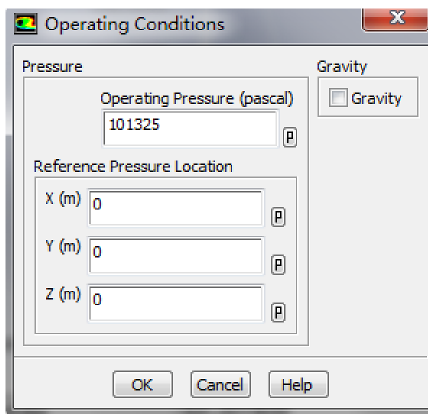


图 3-43　“k-epsilon”湍流模型对应的选择框　　　图 3-44　“Operating Conditions”对话框

5）定义流体的物理性质。

本例流体为空气，管壁为铝，即定义空气和铝的物理性质。选择工具栏中的“Materials”命令，单击“Create/Edit”按钮，弹出图 3-45 所示的对话框。在“Create/Edit Materials”对话框中单击“FLUENT Database”按钮，弹出“FLUENT Database Materials”对话框，如图

3-46 所示。“Material Type”下拉列表框中选择“solid”，左侧的“FLUENT Fluid Materials”栏中选择“aluminum(al)”，下侧弹出“Properties”选项框，显示选中材料的属性，单击“copy”按钮确认即可。

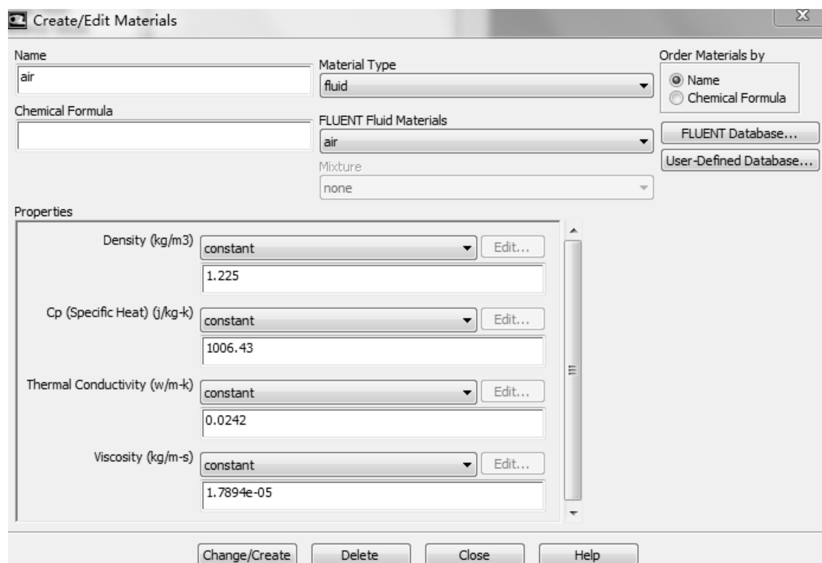


图 3-45 “Create/Edit Materials”对话框

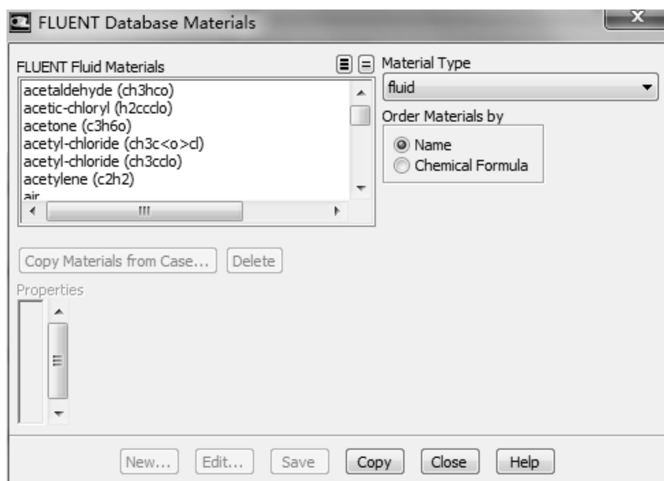


图 3-46 “FLUENT Database Materials”对话框

3.3.3 设置边界条件

（1）设置进口边界条件

选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”菜单命令，出现边界条件的选项框。在“Zone”栏中有很多名称，这是因为流体和固体之间、固体和固体之间要进行“interface”，属性栏中的“inlet”边界，软件默认其为“velocity-inlet”条件。单击“Edit...”按钮，在弹

出的“Velocity Inlet”对话框的“Momentum”Tab 页中，依次选择“Velocity Specification Method”>“Magnitude, Normal to Boundary”，“Reference Frame”>“Absolute”，在“Velocity Magnitude”栏中输入速度值“63m/s”，“Supersonic/Initial Gauge Pressure”栏中值为“0”。下方的湍流项“Turbulence”选项组中，在“Specification Method”下拉列表栏中选择湍动能与湍动能耗散率“K and Epsilon”，如图 3-47 所示。在“Temperature”文本框中输入温度值“803”，如图 3-48 所示，单击“OK”按钮退出。

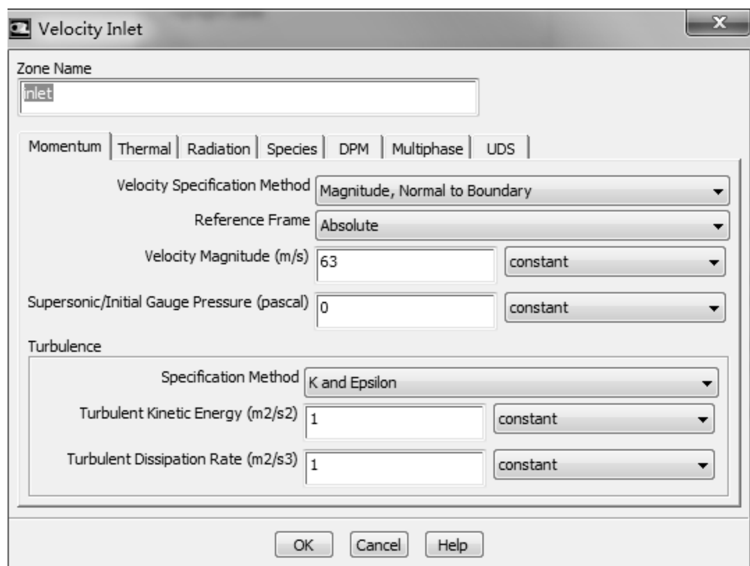


图 3-47　速度设置

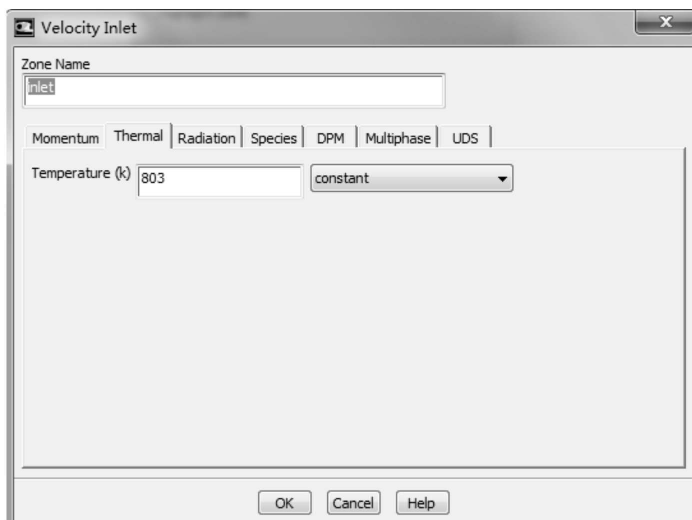


图 3-48　进口温度条件设置

（2）出口边界条件

出口采用压力出口条件，设置方式与进口边界条件相同，在“Momentum”对话框下，

“Gauge Pressure”值为“0”，“Backflow Direction Specification Method”列表框中选择“Normal to Boundary”；在下方的湍流项“Turbulence”选项组中，在“Specification Method”下拉列表栏中选择湍动能与湍动能耗散率“K and Epsilon”，如图 3-49 所示。在“Backflow Total Temperature”文本框中输入温度值“803”，如图 3-50 所示，单击“OK”按钮退出。

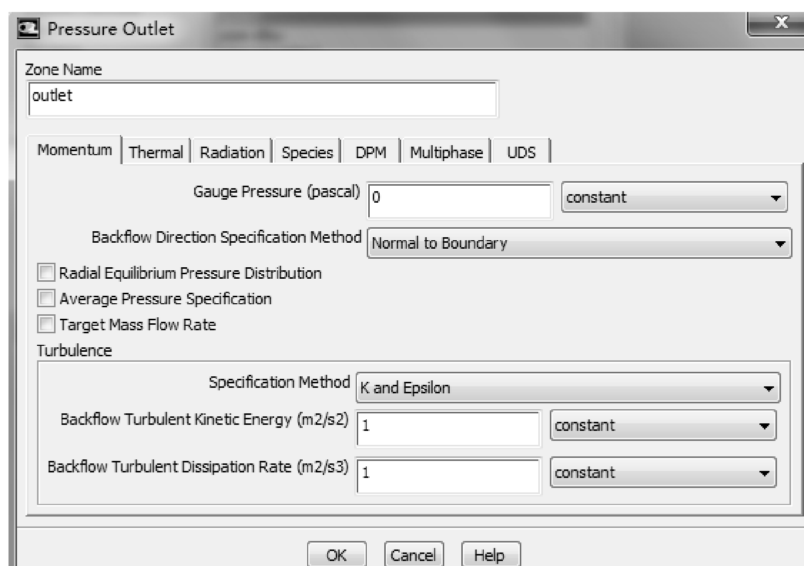


图 3-49　力出口边界

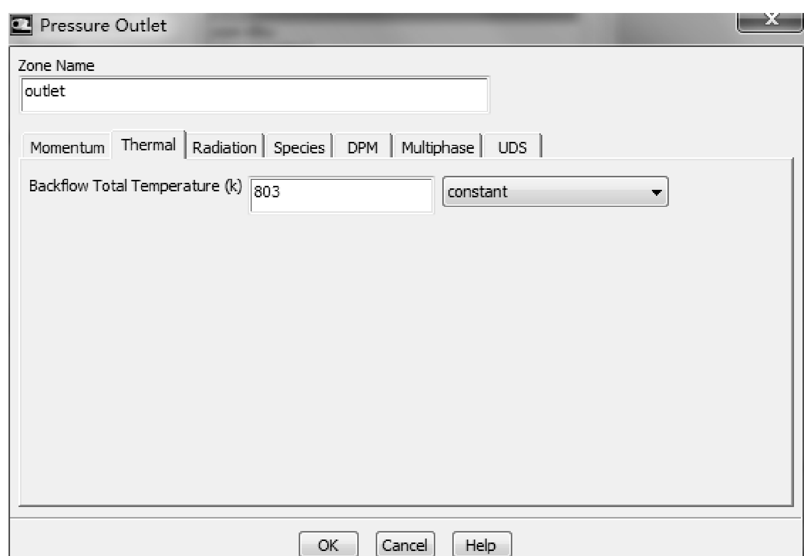


图 3-50　力出口温度设定

（3）其他边界条件

在本例中，区域 wall 处的边界条件保持默认设置。

3.3.4 求解方法的设置与控制

边界条件设定好以后，即可设定连续性方程及湍动方程的具体求解方式。

（1）设置求解算法

单击树形菜单栏下的“Solution Method”，在弹出的“Solution Methods”对话框中设置求解算法。压力与速度的耦合方式采用“SIMPLE”算法；下方的“Spatial Discretization”选项组中，“Gradient”下拉列表框中选择“Least Squares Cell Based”，“Pressure”下拉列表框中选择“Standard”，“Momentum”下拉列表框选择“Second Order Upwind”，湍动能“Turbulent Kinetic Energy”下拉列表框中选择“First Order Upwind”，“Turbulent Dissipation Rate”下拉列表框中选择“First Order Upwind”选项，如图 3-51 所示。

（2）设置求解参数

单击树形菜单栏下的“Solution Controls”，弹出“Solution Controls”对话框，其中的松弛因子保持默认设置即可，如图 3-52 所示。

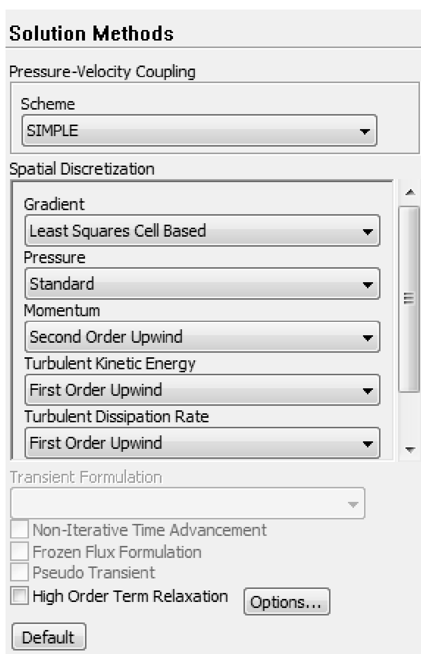


图 3-51　求解算法

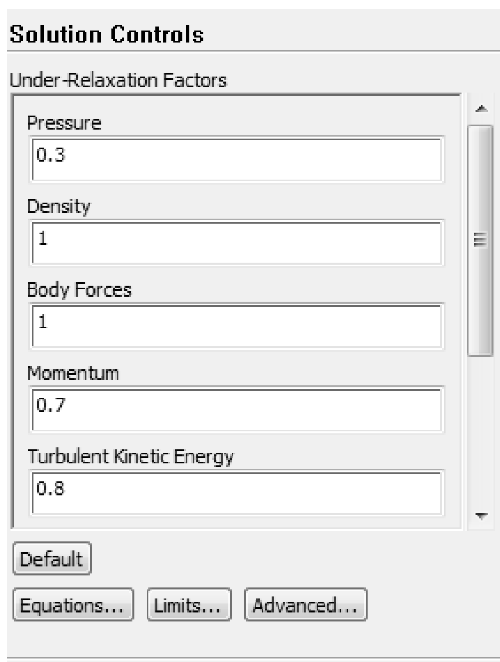


图 3-52　求解参数

（3）设置监控点

单击左侧树形菜单栏中“Monitors”，弹出“Monitors”对话框，如图 3-53 所示。在“Surface Monitors”栏下单击“Create”按钮，弹出“Surface Monitor”对话框，如图 3-54 所示。“Report Type”下拉列表框中选择“Vertex Average”，“Field Variable”下拉列表框中选择“Static Temperature”，在“Surfaces”栏中选择相应的部分后单击“OK”按钮即可。本算例共设定 12 个监控点。



图 3-53 “Monitors”对话框

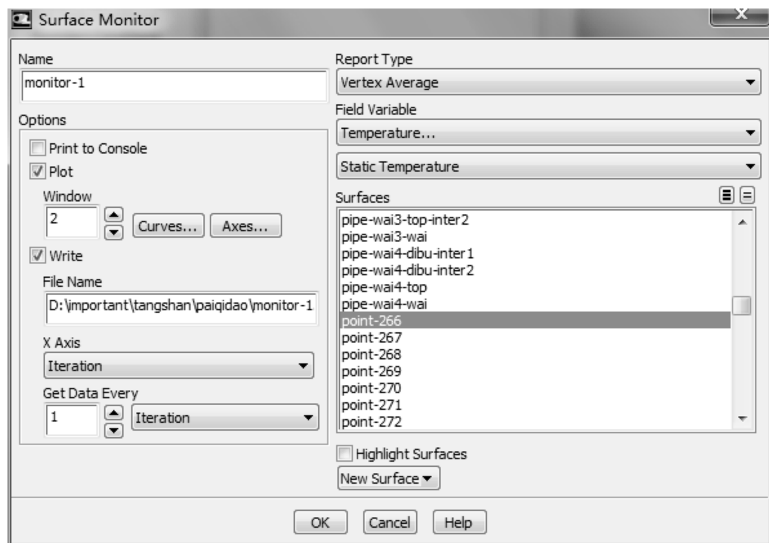


图 3-54 “Surface Monitor”对话框

（4）设置监控点的残差

单击树形菜单中的“Monitors”，双击“Residuals, Statistic and Force Monitors”下的“Residuals-Print, Plot”，弹出“Residual Monitors”对话框，如图 3-55 所示。将“Equations”选项组中的各方程下的“Monitor”选项选中，然后将“Absolute Criteria”下的精度改为“0.0001”，单击“OK”按钮完成设置。

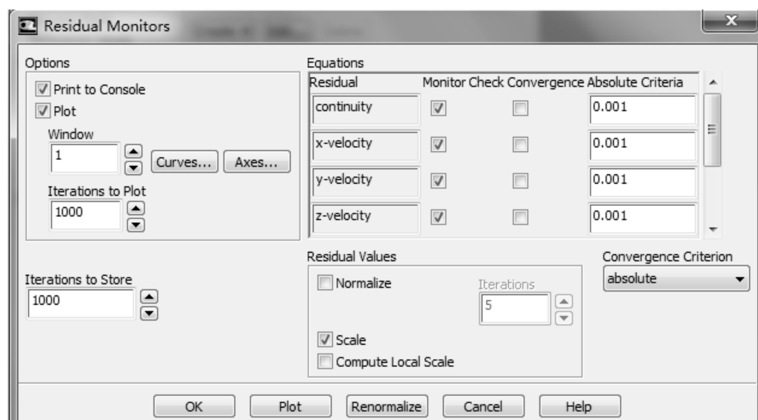


图 3-55　设置残差精度

（5）初始化

选择菜单栏中的“Solve”>“Initialize”命令，弹出“Solution Initialization”选项框，如图 3-56 所示。在“Initialization Methods”选项下选择“Standard Initialization”，在“Compute From”下拉列表框中选择“inlet”选项，“Reference Frame”选项下选择“Relative to Cell Zone”选项，“Initial Values”选项栏中保持默认设置即可。

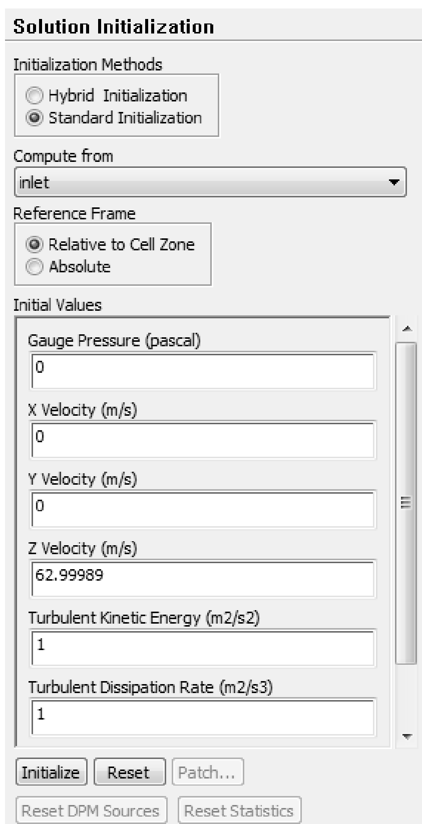


图 3-56　“Solution Initialization”对话框

（6）保持“Solution”>“Calculation Activities”项设置不变。

（7）设置迭代步数

选择“Solution”>“Run Calculation”命令，将其属性栏中“Number of Iterations”项设置为“3000”，如图 3-57 所示。

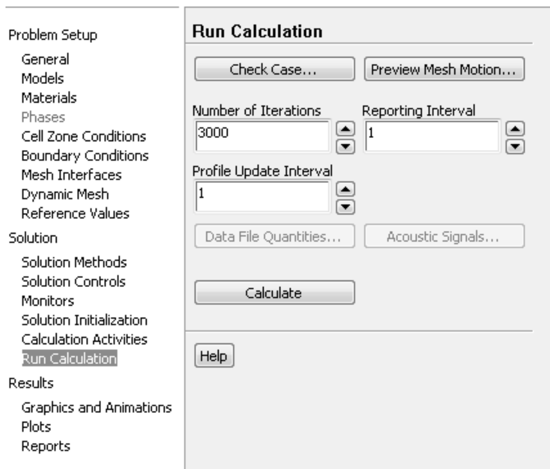


图 3-57　设置迭代步数

3.3.5 计算

单击“Calculate”按钮，进行计算。

计算过程中，视图区的残差曲线图和右下侧脚本区随时根据迭代步数及计算结果进行更新，如图 3-58 所示。用户可以在图中对三个曲线图进行切换。

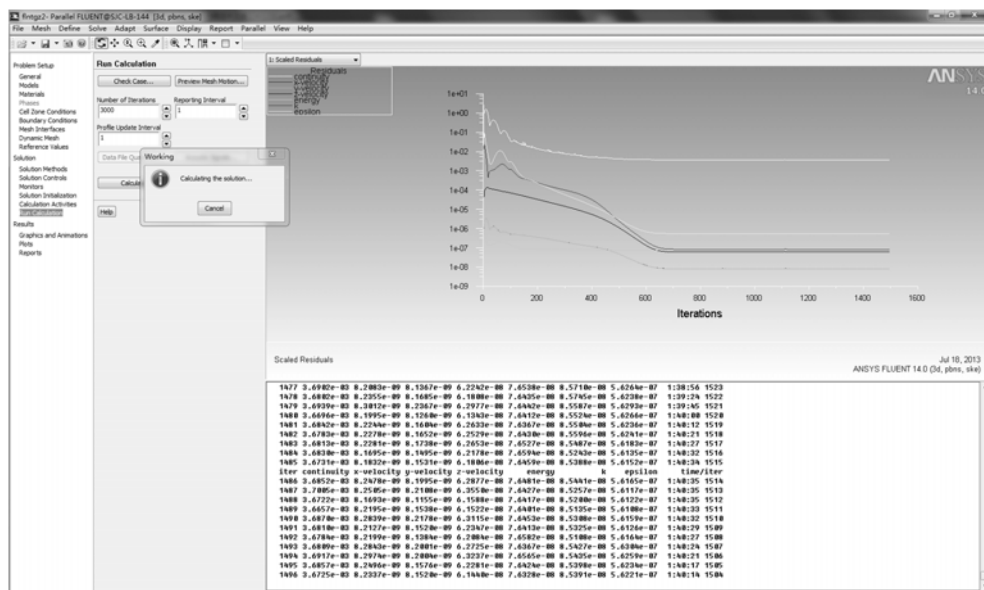


图 3-58　残差曲线图

计算完成后，“Information”对话框会显示计算完成的信息，如图 3-59 所示。单击“OK”按钮确认。

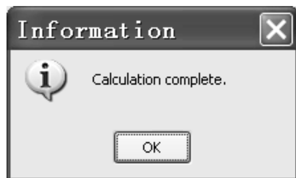


图 3-59　计算完成

3.3.6 计算结果统计

计算完成后，在 FLUENT 中即可进行传热系数的统计。单击树形菜单栏中的“Reports”，右侧弹出其对话框，如图 3-60 所示。在选择框中双击“Surface Integrals”项，弹出“Surface Integrals”对话框，如图 3-61 所示。

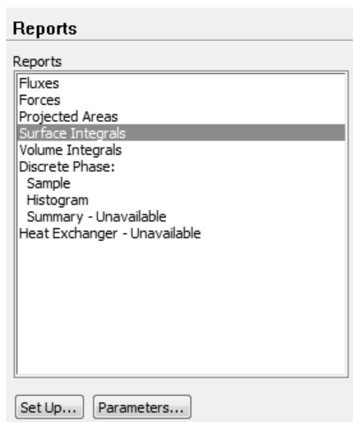


图 3-60　“Reports”对话框

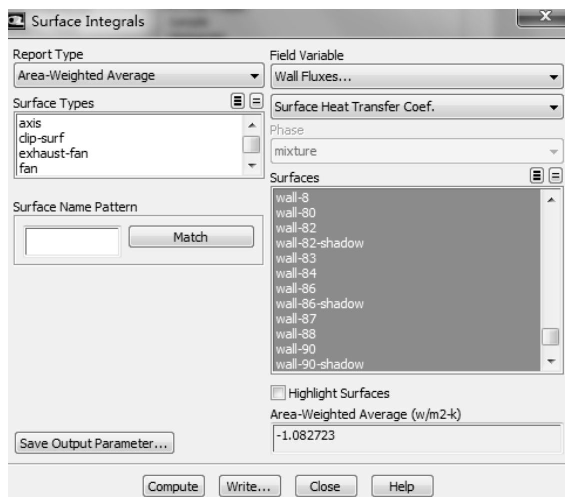


图 3-61　“Surface Integrals”对话框

在“Report Type”下拉列表框中选择“Area-Weighted Average”项，“Field Variable”下拉列表框中选择“Wall Fluxes...”，下面对应的列表栏中选择表面传热系数“Surface Heat Transfer Coef.”，将下面的“Surface”栏中全部选中，单击“Compute”按钮，即可进行传热系数的计算。在下方的“Area-Weighted Average”一栏中显示计算得出的传热系数值，为“-1.082723”，数值的正负表示传热方向，如图 3-61 所示。

至此，传热系数的设置及处理方法已全部完成。

3.4　辐射计算设置与处理

本节对设置和求解辐射问题的步骤进行简单的概述，所给出的设置步骤只与辐射传热问题的模型设置相关，是使用 FLUENT 软件中辐射模型所固有的步骤。但需要注意的是，如

果需要进行辐射传热的计算，就必须使用基于压力的求解器。选择左侧树形菜单栏“General”>“Solver”命令，选择默认解算器。

3.4.1 选择辐射模型

辐射问题的计算模型共有以下几类，分别为“Rosseland”“P1”“Discrete Transfer（DTRM）”“Surface to Surface（S2S）”“Discrete Ordinates（DO）”。不同的辐射计算模型有不同的参数设置选项。选择使用 DTRM 辐射模型，选择该模型后进行参数设置；选择 S2S 模型，就需要计算或读取角系数；当选择使用 DO 模型，就会出现 DO/Energy Coupling 选项，通过该选项可以改变能量方程中辐射源项与能量方程的求解过程，使用 DO 模型需要用户首先定义节点角度的离散。激活辐射模型后，FLUENT 就会自动激活能量方程的计算，而不需要单独去激活能量方程。这样，在每次模型求解的迭代计算过程中，对能量方程的求解计算就包含了辐射热流。本例以“Rosseland”模型为例进行简要说明。

首先通过面板中选定某个辐射模型激活辐射热传递计算。左侧树形菜单中选择“Models”>“Radiation”命令，选择“Rosseland”辐射模型后单击“OK”按钮即可。这时会出现一个信息提示框，提示新的材料物性被添加了，如图 3-62 所示，读者需要在后面设置物性参数，因此现在只需单击“OK”按钮确认这个信息即可。

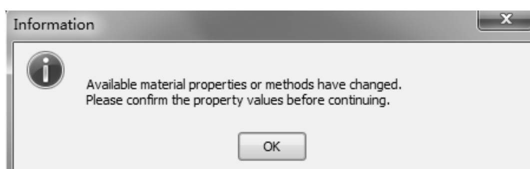


图 3-62 添加新材料的信息提示框

3.4.2 边界条件的设定

在上一节的传热系数计算中，所有的壁面边界条件中“Thermal”下拉列表框下均选择对流换热“Convection”项。而在本节的辐射计算中此处均选择温度“Temperature”，且设定温度值为“803”，如图 3-63 所示。其余的边界条件与传热系数的边界条件相同。

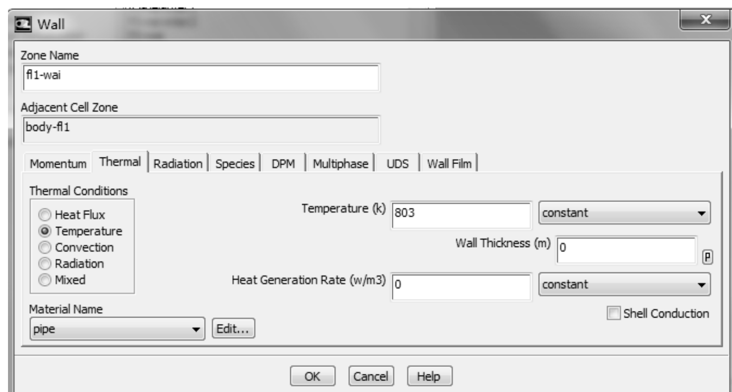


图 3-63 辐射计算的壁面边界条件设定

3.4.3 设定材料物性参数

默认的流体材料为空气，而此次要解决的问题中工作介质也正是空气，因此不用重新设

定材料的物性参数。若流体的参数需要重新指定，路径为左侧树形菜单栏“Materials”，在弹出的选择框中选择“Fluid”，如图 3-64 所示，单击“Create/Edit…”按钮弹出“Create/Edit Materials”对话框，如图 3-65 所示。

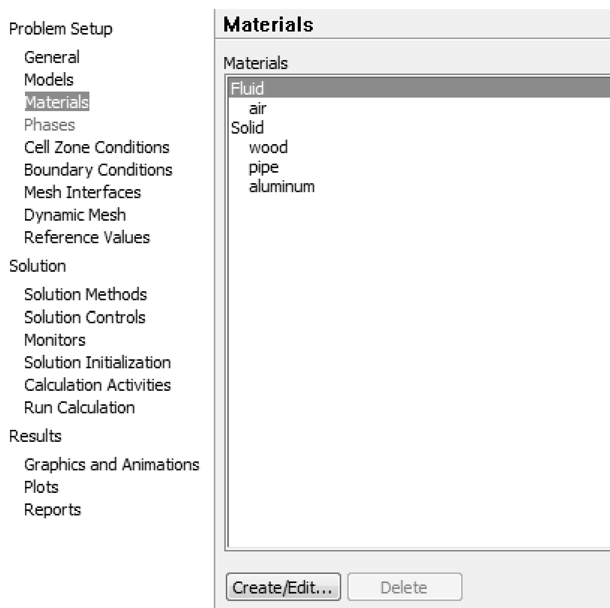


图 3-64　设定材料的物性参数面板

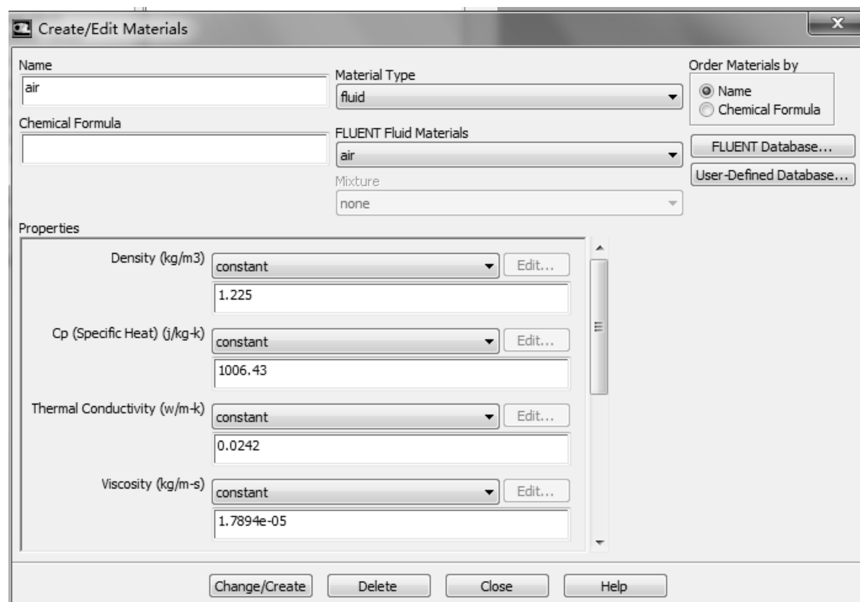


图 3-65　设定材料的物性参数

根据材料的性质进行以下参数的修改，分别为密度“Density（kg/m^3）”、比热容“Cp（Specific Heat）（j/kg-K）”、导热系数“Thermal Conductivity（W/m-K）”、黏度“Viscosity

（kg/m-s）”、吸收系数“Absorption Coefficient（1/m）”、散射系数“Scattering Coefficient（1/m）”和散射相位函数“Scattering Phase Function”是解决散射问题时用到的，其余时候保持默认值，单击“Change/Create”按钮。

3.4.4 求解方法的设置

（1）设置求解算法

在传热系数的求解算法基础上，将压力“Pressure”下拉列表框中选择“PRESTO!”，“Momentum”和“Energy”项选择“Second Order Upwind”。其中能量一项需要将滚动条下拉显示，如图 3-66 所示。

（2）流场初始化

在左侧树形菜单栏中选择“Solution Initialization”后，在右侧的初始值“Initial Values”选项组中，将温度“Temperature(K)”设定为“803”，单击初始化“Initialize”按钮确认即可，如图 3-67 所示。

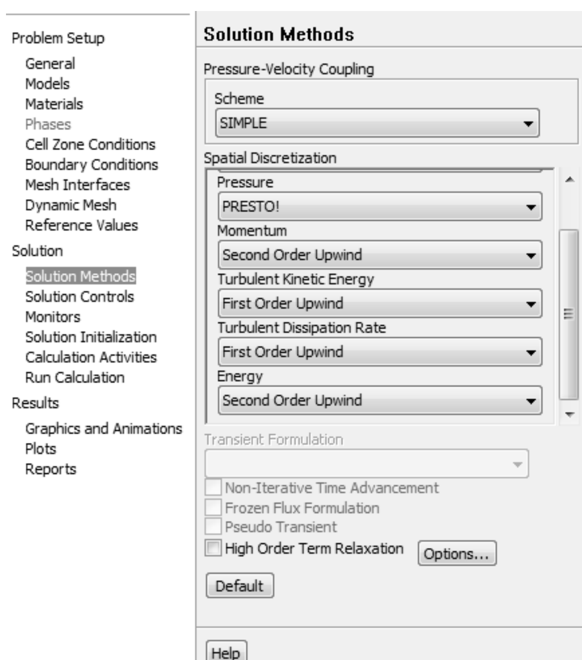


图 3-66 求解算法的设置

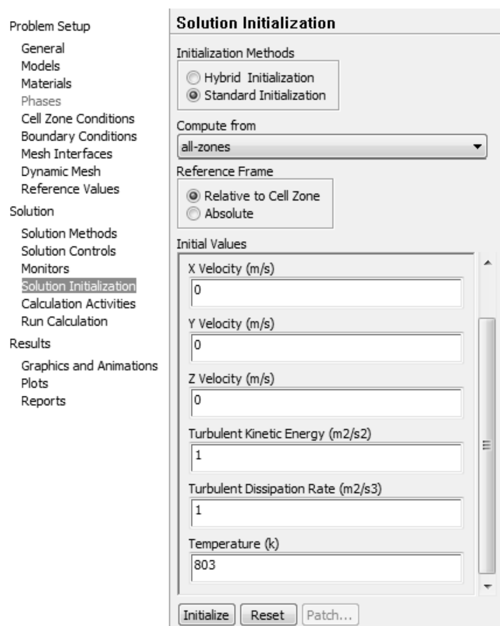


图 3-67 初始化

Rosseland 模型不能解决额外的辐射热传播方程，因此不能显示出辐射残差曲线，当使用“the P-1 and Do”模型时，就可以解决辐射输运方程，能显示出辐射残差曲线。

（3）计算

单击“Calculate”按钮，进行计算，残差曲线如图 3-68 所示。

选择菜单栏“File”>“Write”>“Case & Data...”命令，保存“cas”文件和“dat”数据文件，如图 3-69 所示。



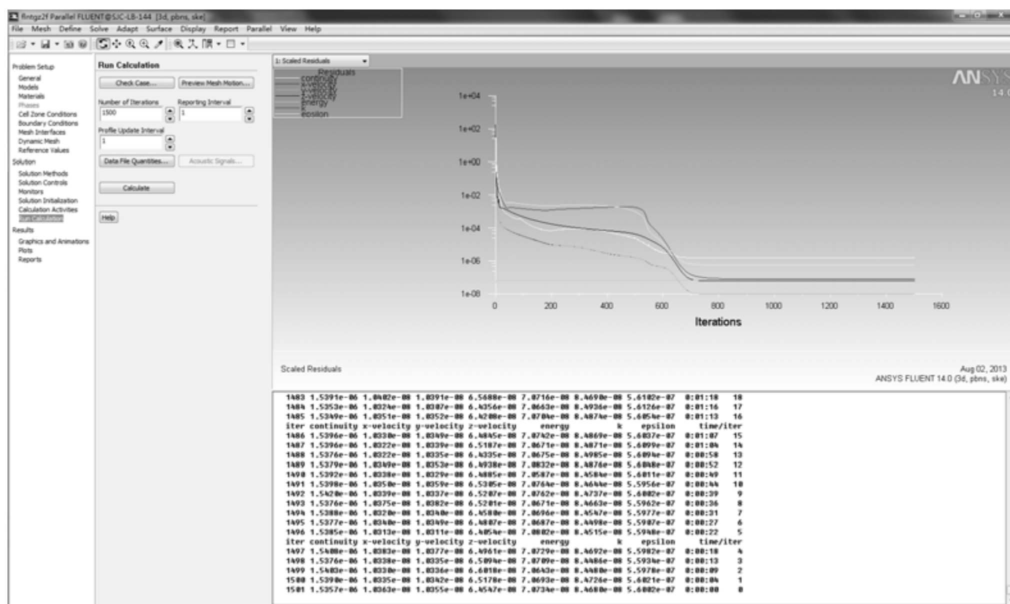


图 3-68　残差计算曲线

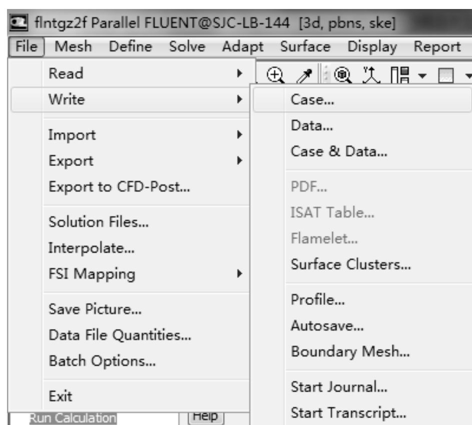


图 3-69　保存“case”文件

3.4.5 计算结果后处理

本算例着重介绍 CFD-Post 软件的后处理。

1）启动 CFD-Post 软件，导入 Fluent 软件计算结果文件。选择菜单项“File”>“Load Results...”，选择文件名“flntgz2fushe.cas”，单击“Open”按钮，弹出“Global Variable Ranges”对话框，如图 3-70 所示。

单击“OK”按钮，即可将“……cas”文件导入到软件中，如图 3-71 所示。

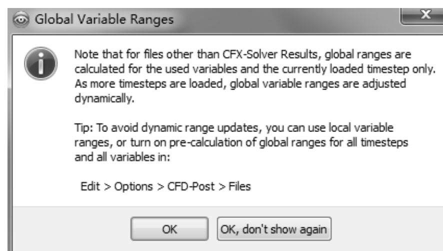


图 3-70　“Global Variable Ranges”对话框

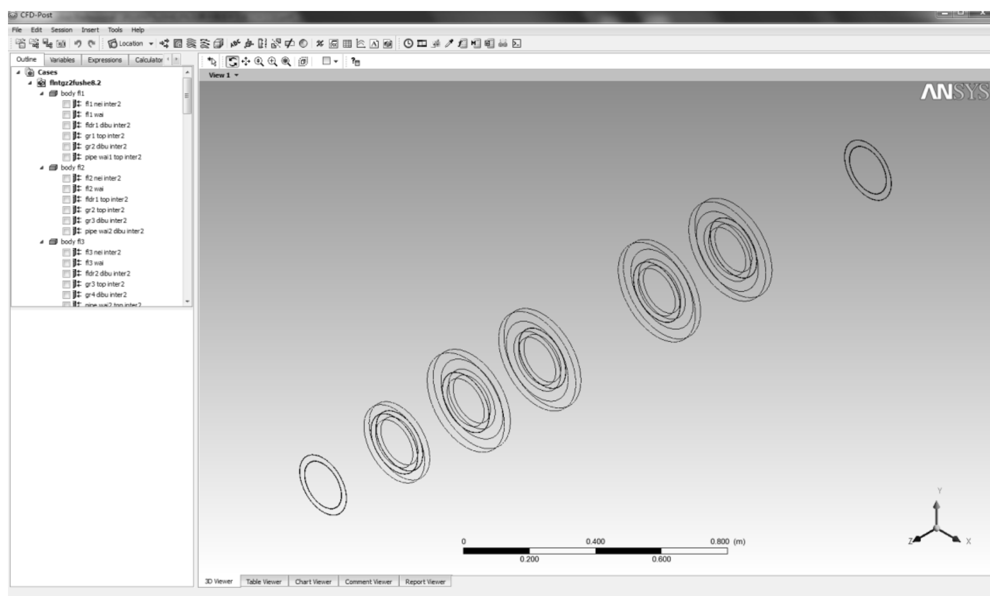


图 3-71　导入计算结果文件

2）创建温度云图。单击工具栏中的“contour”项（按钮），选择默认文件名“Contour1”，单击“OK”按钮，在左侧菜单栏出现“Contour1”的细节控制栏“Details of Contour 1”，如图 3-72 所示。

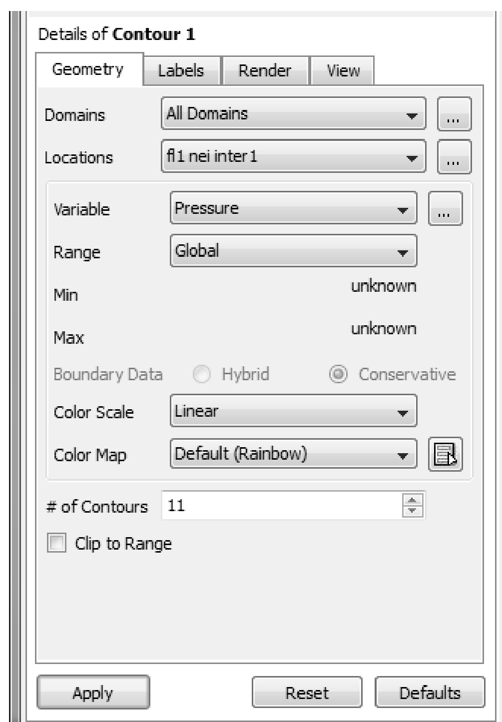


图 3-72　云图控制栏

在云图细节控制栏中“Geometry”选项下进行云图选择与设定。在“Domains”下拉列表框中选择“All Domains”，在“Locations”选项中选择需要显示云图的表面，本算例显示管道内表面，变量“Variable”一栏选择欲表述的变量，在“Range”下拉列表框中选择“Local”，单击下方“Apply”按钮确认即可，温度分布如图 3-73 所示。

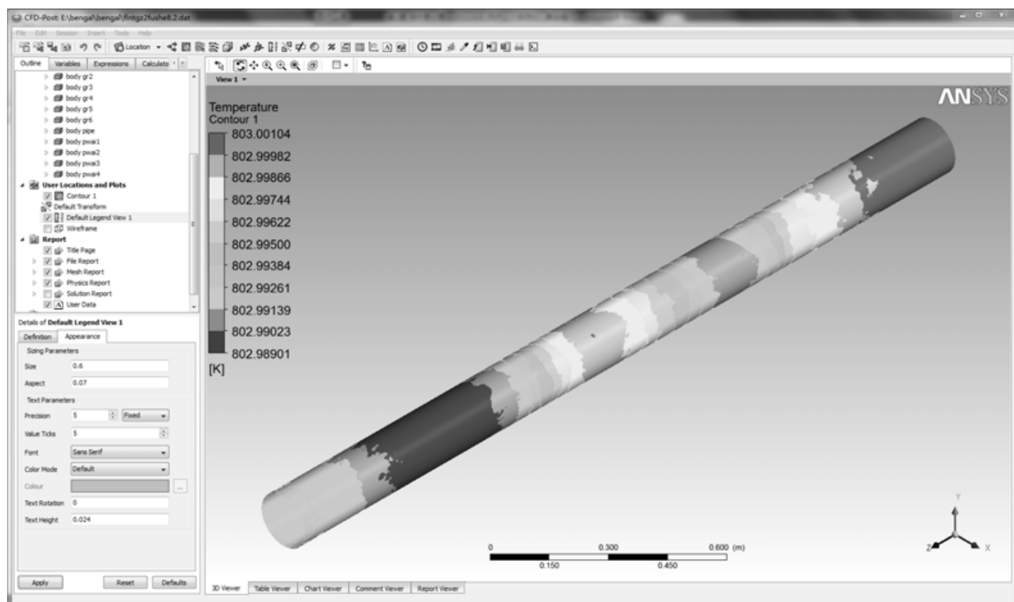


图 3-73　内管壁的温度分布

可以看出，由辐射产生的温度由传热管入口至出口逐渐降低。

3）创建截面。选择“Location”>“Plane”命令，创建截面，如图 3-74 所示。

弹出命名截面的提示框，如图 3-75 所示，输入名称后单击“OK”按钮即可。

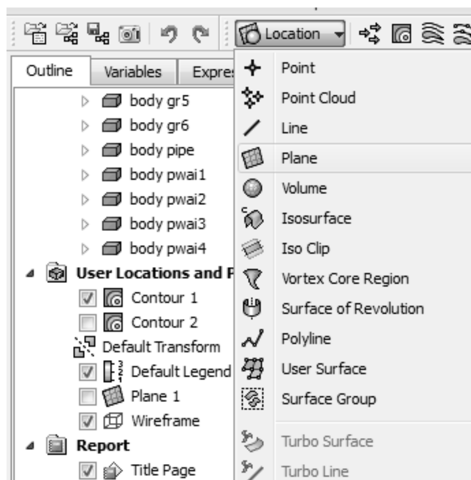


图 3-74　创建截面

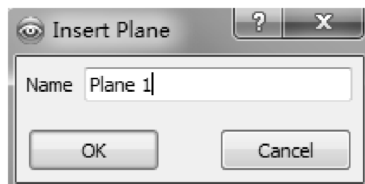


图 3-75　平面命名提示框

随后在左侧菜单栏出现“Details of Plane 1”的控制框，如图 3-76 所示。

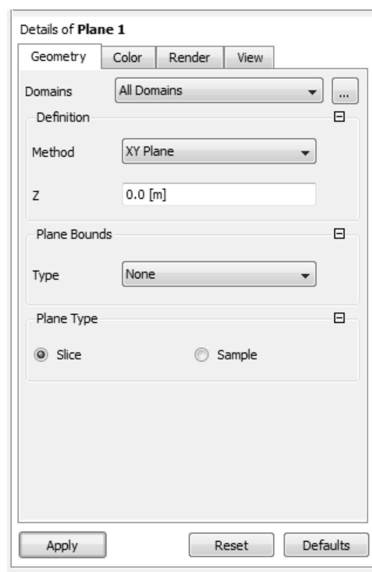


图 3-76 “Details of Plane 1”的控制框

在“Geometry”选项卡中的“Domains”下拉列表框中选择“All Domains”，在“Method”下拉列表框中选择平面，本例选择“YZ Plane”，下面的“X”为 YZ 平面的位置，在“Type”下拉列表框中选择“None”，在“Plane Type”下选择“Slice”，然后单击“Apply”按钮确认即可。创建的平面如图 3-77 所示。

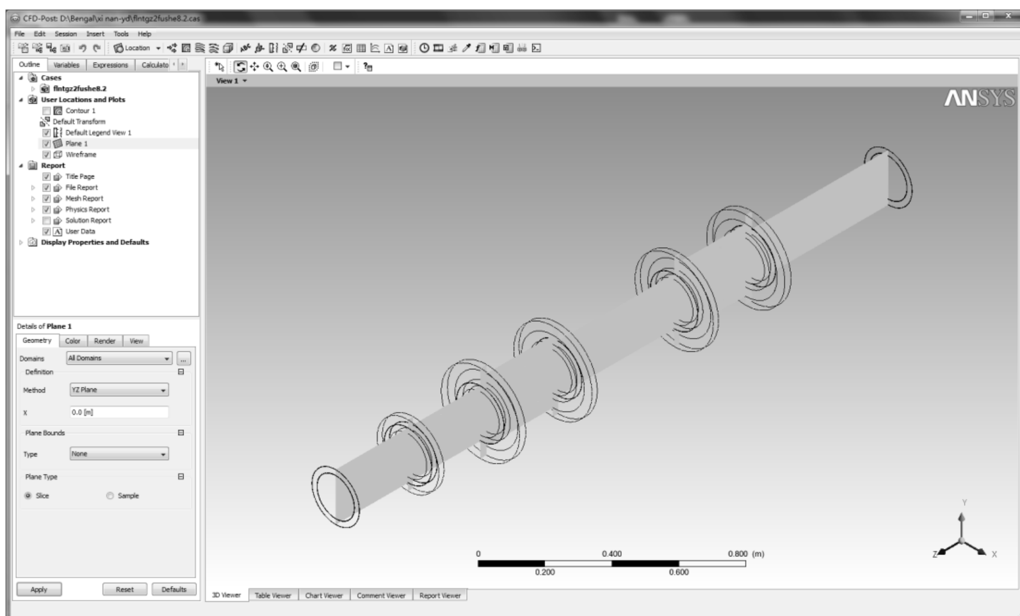


图 3-77 创建的平面

4）在创建的平面上显示云图。创建的云图和平面均在左侧树形菜单栏“User Locations and Plots”中显示，双击图标进行各个视图及功能的切换，如图 3-78 所示。

双击“Contour 1”图标 Contour 1，下面控制栏变为“Details of Contour 1”，“Domains”下拉列表框选择显示的区域，此处选择内部流体区域“body fluid”，将“Locations”栏中的选项修改为刚刚创建的平面，本例为“Plane 1”，单击下方“Apply”按钮确认，显示窗口显示图形如图 3-79 所示。

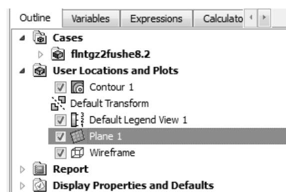


图 3-78　创建的云图及平面

由上图标尺栏可以看出，排气管道的入口和出口温差很小，因此需要细化标尺栏的数值精度。选择树状菜单中的“Default Legend View 1”选项，下方弹出“Details of Default Legend View 1”操作栏，如图 3-80 所示。选择“Appearance”按钮 Appearance，在“Precision”文本框中调整精度，本文选择精确到小数点后面五位数字，单击“Apply”按钮确认即可。

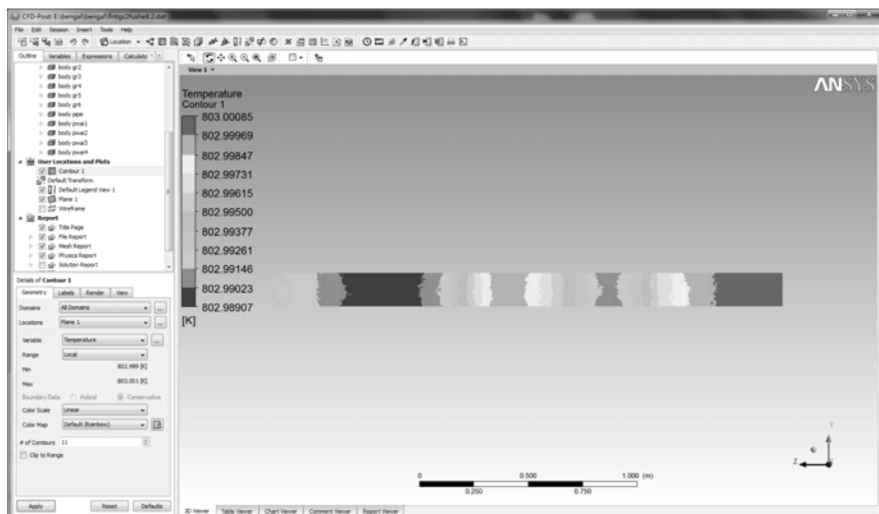


图 3-79　截面显示图

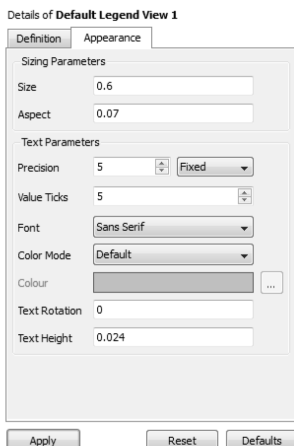


图 3-80　“Default Legend View 1”控制栏

注意：本章对应的源文件详见光盘文件夹“bengal”。

第 4 章 小汽车空气动力学性能计算

本章主要内容：

本章主要通过小汽车运行工况下空气动力学性能的计算案例来介绍利用 FLUENT 软件进行空气动力学计算的设置方法及求解技巧。

本章学习目标：

✧ 小汽车气动性能的计算方法。

✧ ICEM-CFD 网格划分方法及流程。

✧ FLUENT 软件计算设置流程及求解技巧。

✧ CFD-Post 计算结果后处理技巧。

4.1 实例介绍

本章针对小汽车运行工况下空气动力学性能进行仿真计算分析，首先通过 ICEM-CFD 软件进行前处理、非结构化网格划分及边界设定，建立小汽车空气动力学计算模型，然后利用 FLUENT 软件进行求解，并通过 CFD-Post 进行后处理，最终得到小汽车在运行工况下的阻力、升力等气动力及其系数以及车体表面压力、速度分布情况。小汽车运动模型如图 4-1 所示。

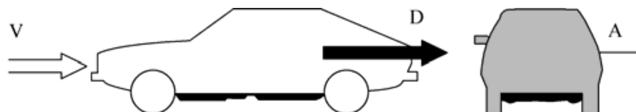


图 4-1 小汽车车身阻力及阻力系数含义

气动阻力计算公式为：

$$D = \frac{\rho}{2} c_{\mathrm{D}} A V^2 \tag{4-1}$$

气动阻力系数计算公式为：

$$c_{\mathrm{D}} = \frac{D}{\frac{\rho}{2} A V^2} \tag{4-2}$$

式中 D——气动阻力，单位为 N；

c_{D}——气动阻力系数；

ρ——空气密度，单位为 kg/m^3；

A——汽车迎风面积，单位为 m^2；

V——汽车运行速度，单位为 m/s。

4.2 模型处理及网格划分

4.2.1 导入模型

1）通过开始菜单，启动 ICEM-CFD 软件，如图 4-2 所示。

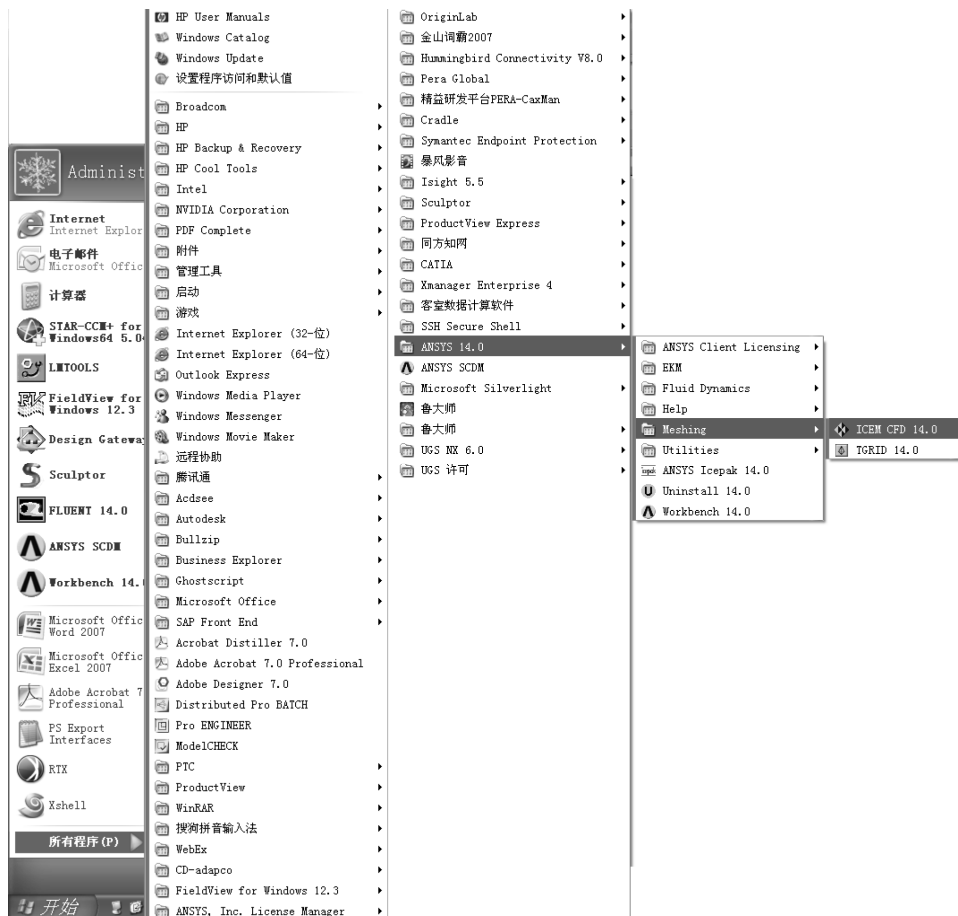


图 4-2 启动 ICEM-CFD 软件

2）选择“File”>“Import Geometry”>“STL”菜单命令，选择计算模型的打开格式，如图 4-3 所示。由图 4-3 可知，软件包括多种可导入格式，可支持多种 CAD 软件输出的文件格式，可以根据实际情况进行选择。

3）打开计算模型。在弹出的“打开”对话框中，选择“car.stl”项，如图 4-4 所示。单击“打开”按钮确认操作。稍后会出现图 4-5 所示的“STL import option”对话框。

4）默认对话框中的选项，单击“Done”按钮，完成导入模型。勾选“Model”>“Geometry”>“Surfaces”项，然后选择“Solid Full display”（即按钮 ），视图区小汽车模型示意图如图 4-6 所示。

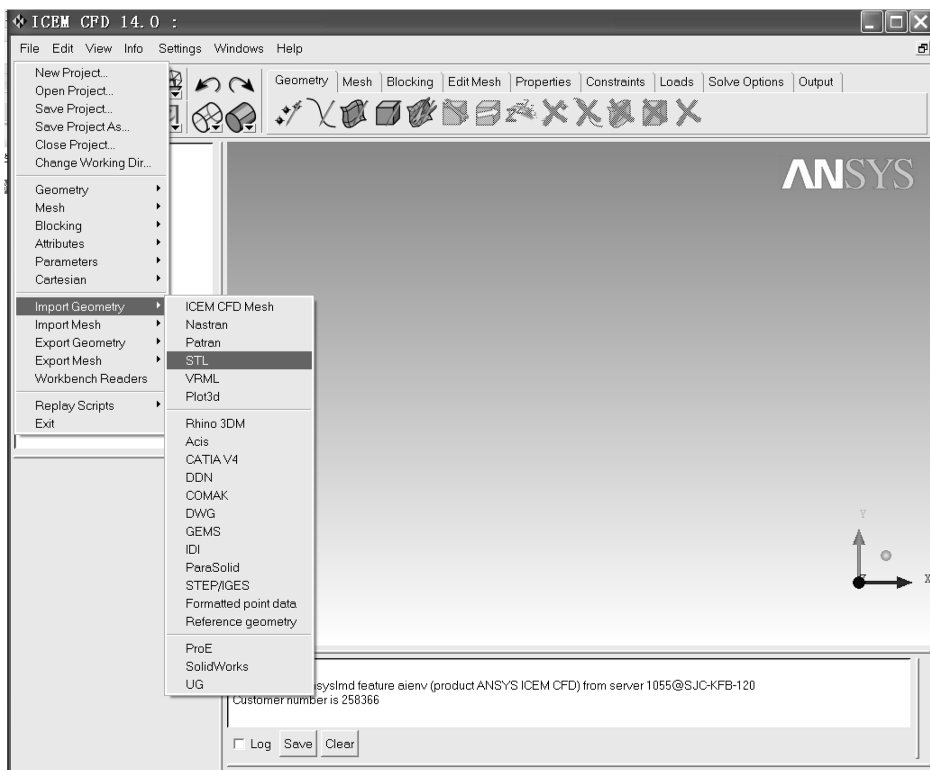
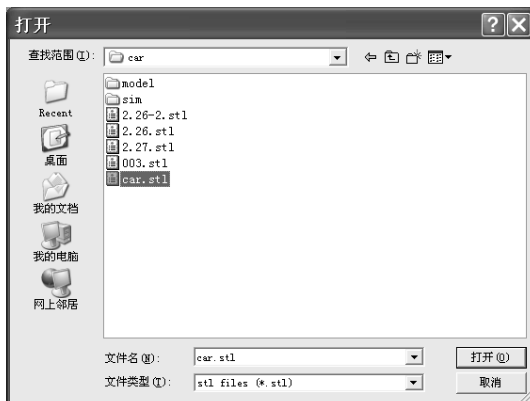


图 4-3　选择计算模型的打开方式



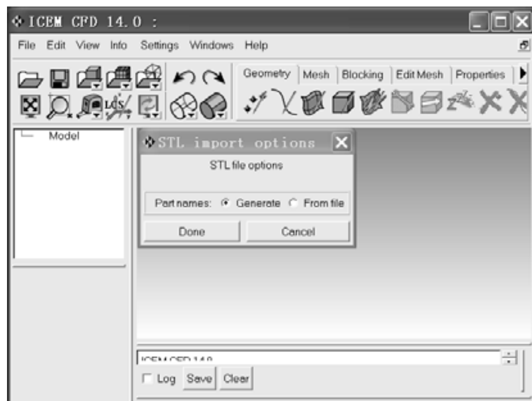


图 4-4　打开计算模型　　　　图 4-5　“STL import option”对话框

5）确定模型尺寸。软件默认网格尺寸按 mm 计算，对模型尺寸进行测量，单击，选择 Measure Distance，然后选择模型中的两点进行测量，如图 4-7 所示，从测量结果可以看出，模型与实际尺寸相差 1000 倍，需放大模型至实际尺寸。

6）选择工具栏命令“Geometry”>“Transform Geometry”（即项），按〈A〉键，选择整个模型，即 Select surface CAF ..，然后单击按钮。在“Scale Geometry”项下的“X factor”“Y factor”“Z factor”中均输入放大倍数“1000”，如图 4-8 所示。单击“Apply”按钮确认操作，得到模型的实际尺寸。

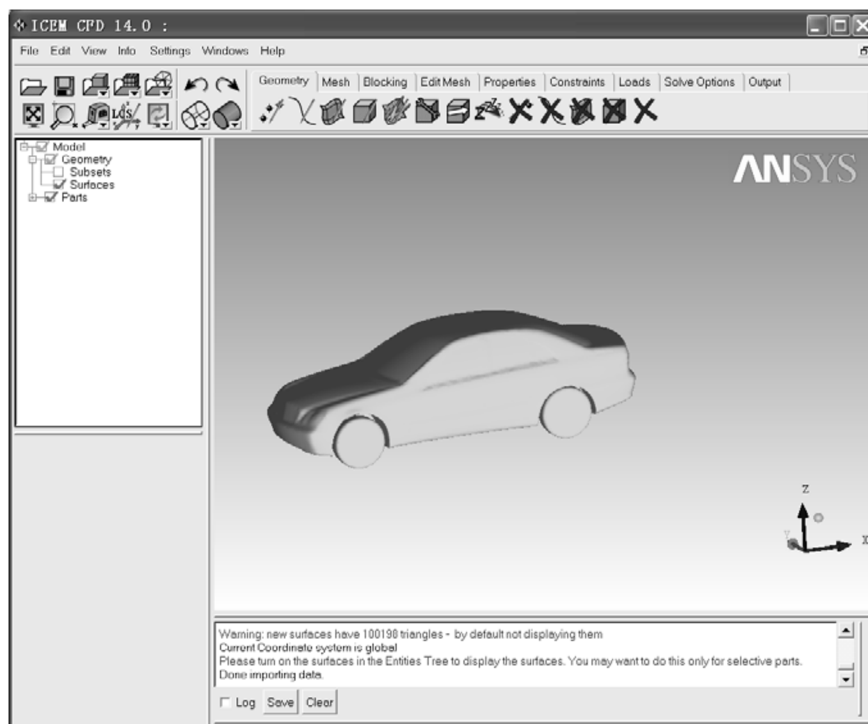


图 4-6　小汽车模型示意图

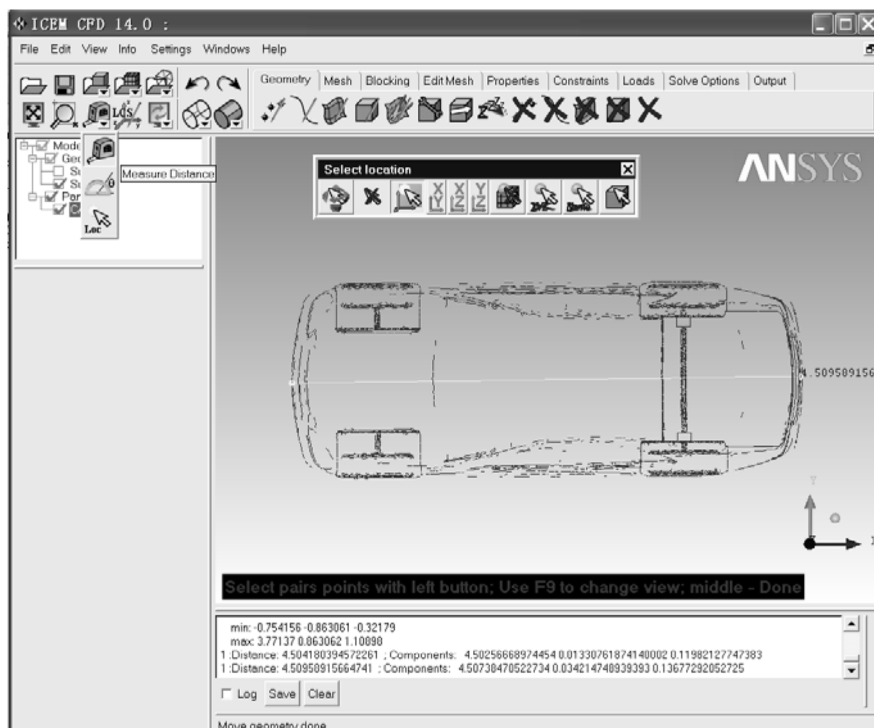


图 4-7　模型尺寸测量

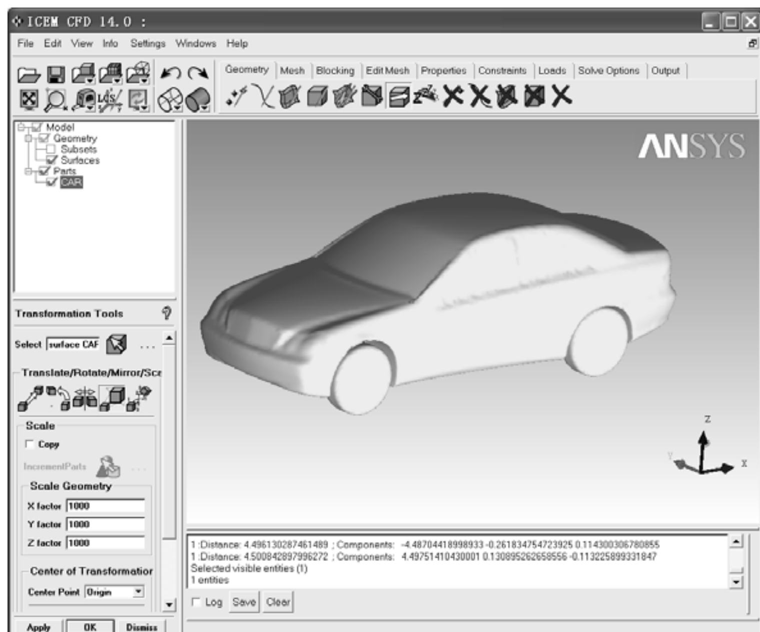


图 4-8 模型放大至实际尺寸

4.2.2 检查模型

1）检查模型面网格。选择工具栏命令“Geometry”>“Repair Geometry”（即项），单击属性栏中的按钮。在“Tolerance”项中输入“0.01”，如图 4-9 所示。单击“Apply”按钮确认操作。

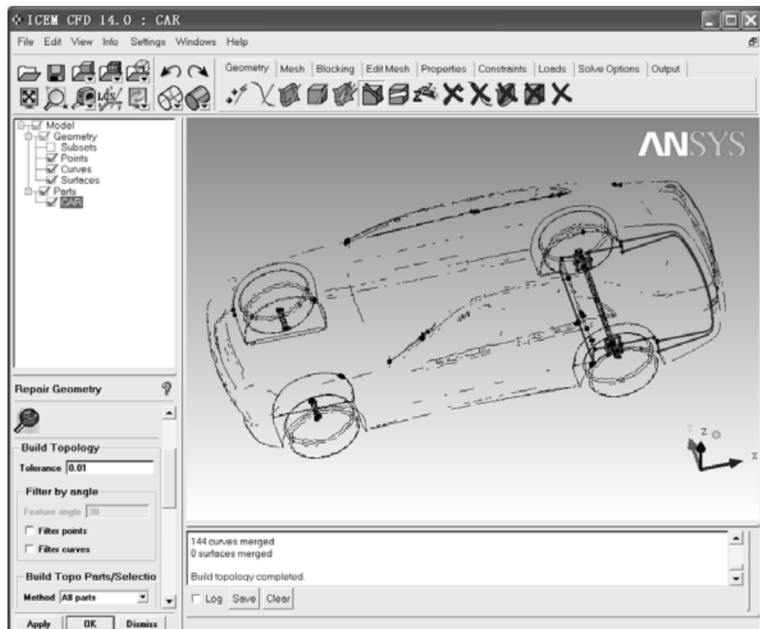


图 4-9 建立拓扑结构后模型示意图

2）建立拓扑结构后，会出现不同颜色的线，分别是 green = 自由边， yellow = 单边，red = 双边，blue =多边，Grey = dormant（过滤掉），曲线颜色指示邻近表面的关系，其中 red 表示在容差之内，这是不需要修改的，green、yellow 需要采用不同手段消除这些边的存在，blue 表示多于两个面在容差之内，在这种情况，容差大于了实体的厚度，采用 UNDO 方式撤销操作。

一般情况下，容差应该是预计最小网格尺度的 1/10，或是捕捉最小几何特征尺度。在本文的算例中，进行网格拓扑后，显示只有 red 边，这是在容差之内，说明网格拓扑结构较好，不需要进行修改。

4.2.3 建立计算域

1）选择工具栏命令“Geometry”>“Create/Modify Surface”（即项），选择视图区中的图标，如图 4-10 所示。在“Create Std Geometry”中保持选择“Box”项（即项），在“Box Dimensions”栏中保持“Method”项为“Specify”。

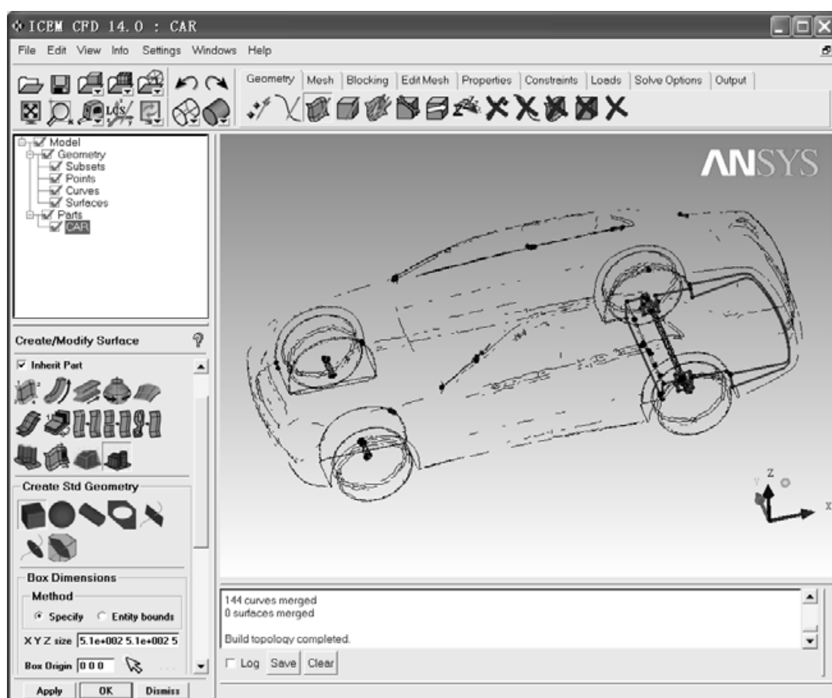


图 4-10 建立计算域

2）单击属性栏“BOX Origin”项右侧按钮，视图区出现“Select location”工具条，如图 4-11 所示。选择工具条上的按钮，单击图 4-11 所示的点，显示出该点的坐标值：（−698.61，16.2360，−20.953）。

采用同样的方法可以获得轮胎最低点的坐标为（−39.031，827.960，−316.71）。

3）鉴于模型长度约为 4.5m，高度约为 1.4m，宽度约为 1.7m，计算域沿车长方向取 10 倍车长，前端为车长 3 倍，车宽方向取 20m 对称分布，车高方向取 20m。在属性栏输入以下信息：

“XYZ size”为“45000 20000 20000”，“BOX Origin”为“-14000 -10000 -330”。

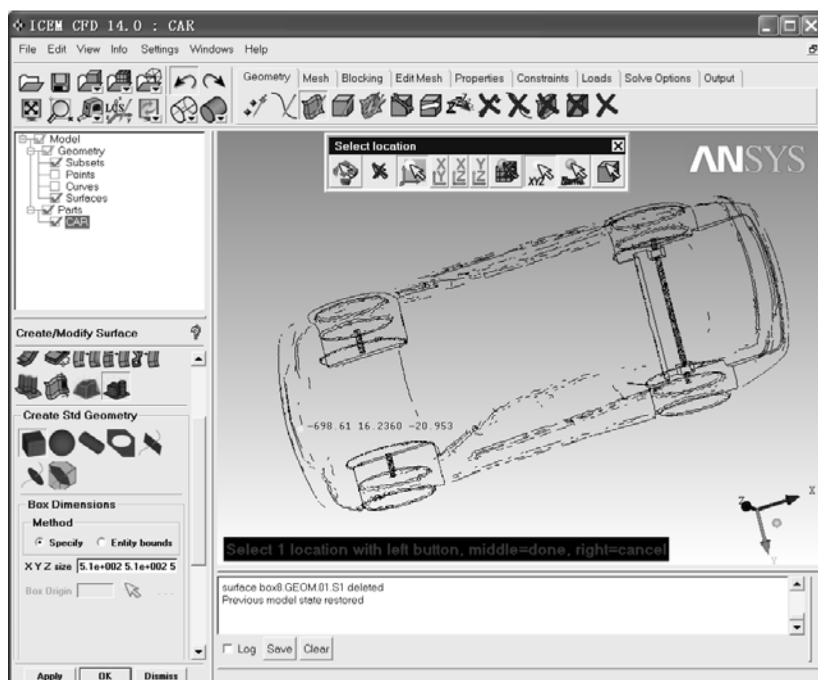


图 4-11　显示点的坐标值

创建好的计算域如图 4-12 所示。

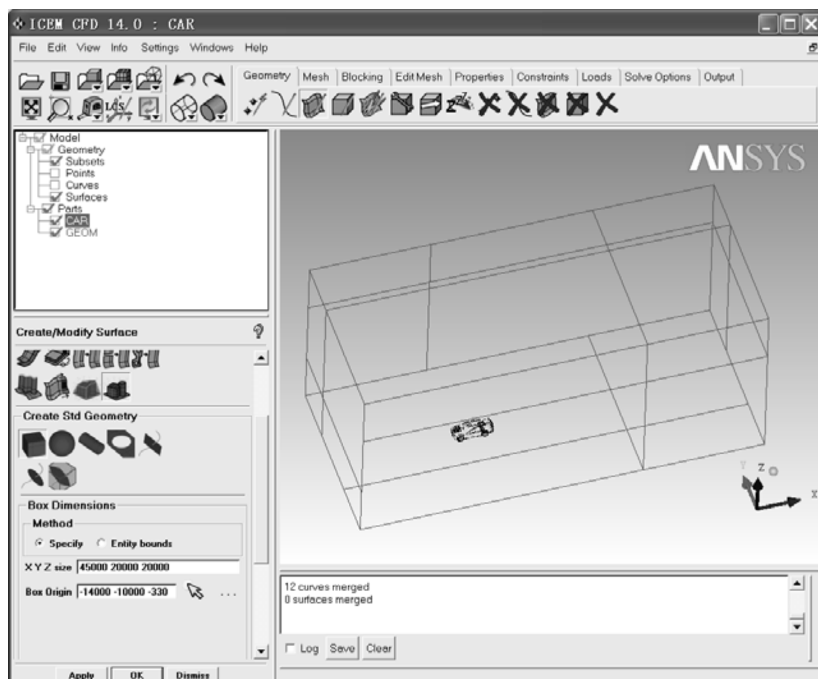


图 4-12　创建好的计算域

4.2.4 创建流体域的 Body 项

1）选择工具栏命令“Geometry”>“Create Body”（即 项），选择视图区中的图标 ，如图 4-13 所示。

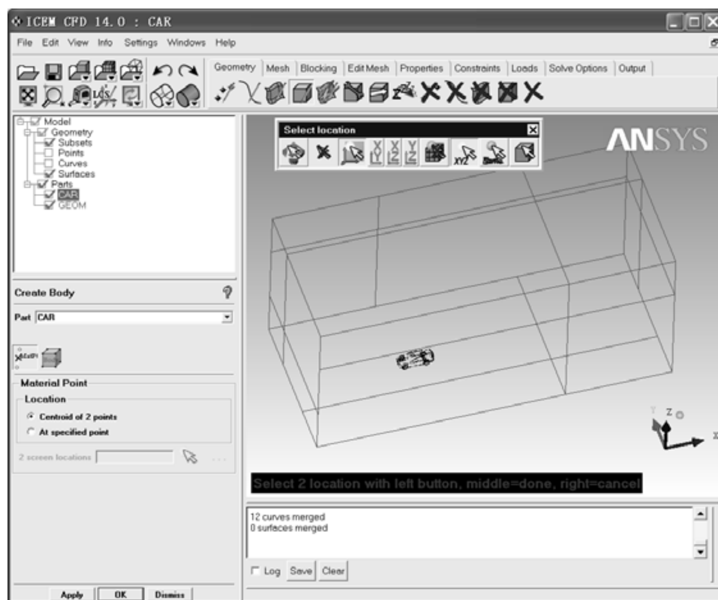


图 4-13 创建 Body 项

2）在计算域及车体上各选择一点，单击鼠标中键确认操作。新生成的 Body 点如图 4-14 所示。其中计算域点可以选择在对角点上。

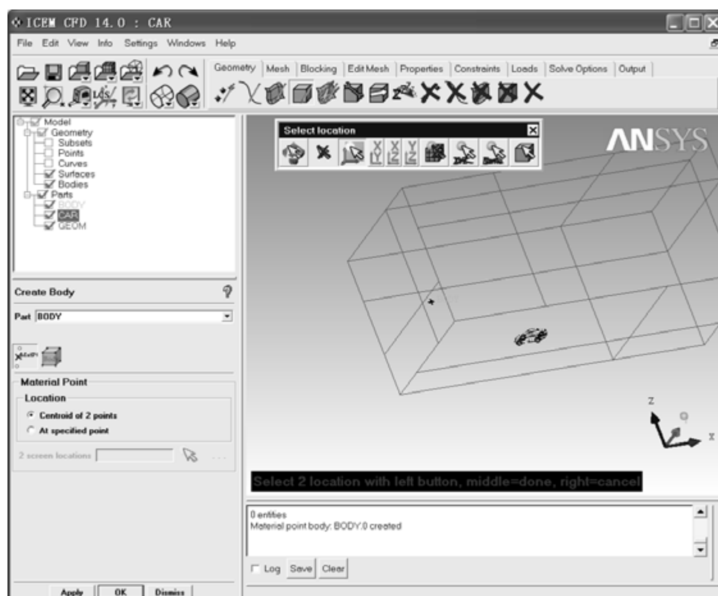


图 4-14 生成 Body 点

4.2.5 创建 Part 项

（1）Points 项

勾选“Model”>“Geometry”>“Points”项，取消选择“Model”>“Geometry”下的其余项和“Model”>“Parts”>“Body”项。视图区中仅显示出所有点。右键单击“Model”>“Parts”，选择“Create Part”项。修改属性栏中“Part”名为“Points”。

单击属性栏中的按钮项，视图区出现“Select geometry”工具条，如图 4-15 所示。

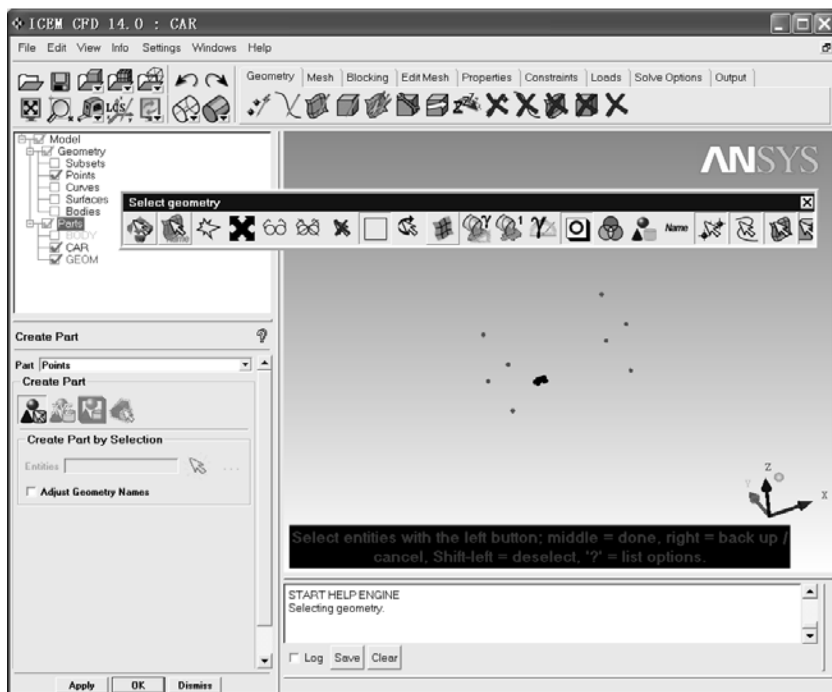


图 4-15 选中所有点

单击“Select geometry”工具条中的按钮（选择所有可见几何体），或按〈A〉键，全部选择视图区中不同颜色的所有点。

单击中键确认操作，视图区中的所有点显示为一种颜色，同时左侧树形菜单栏出现“Model”>“Parts”>“POINTS”项，如图 4-16 所示。

单击中键，生成名为“POINTS”的 Part 项。

（2）Curves 项

勾选“Model”>“Geometry”>“Curves”项，取消选择“Model”>“Geometry”下的其余项。视图区中仅显示出所有曲线。

修改属性栏中“Part”名为“Curve”。单击属性栏中的按钮项，视图区出现“Select geometry”工具条。同样单击“Select geometry”工具条中的按钮，或按〈A〉键，全部选择视图区中不同颜色的所有曲线。

单击中键确认操作，视图区中的所有曲线显示为一种颜色，同时左侧树形菜单栏出现“Model”>“Parts”>“CURVE”项，如图 4-17 所示。

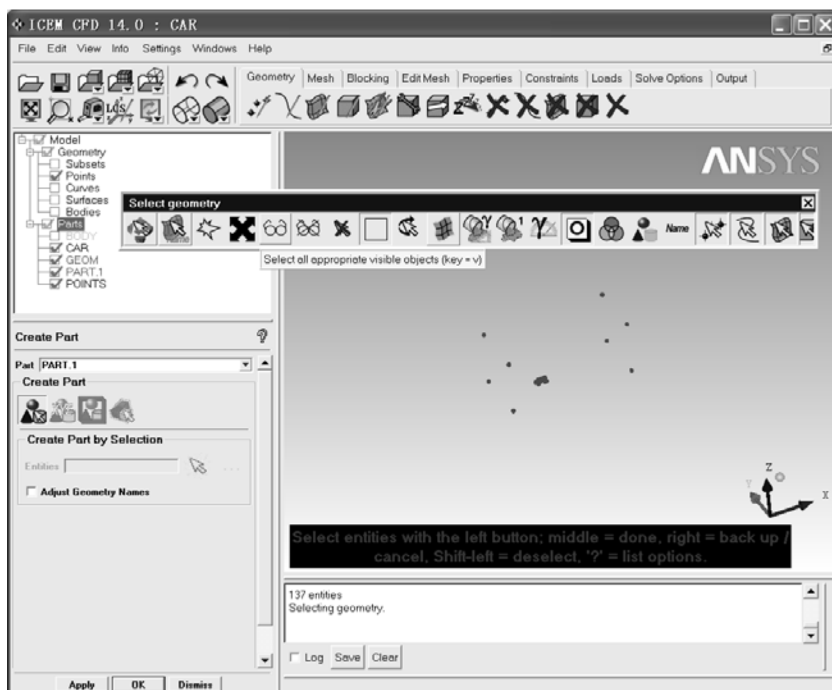


图 4-16　生成 Parts 项中的“POINTS”项

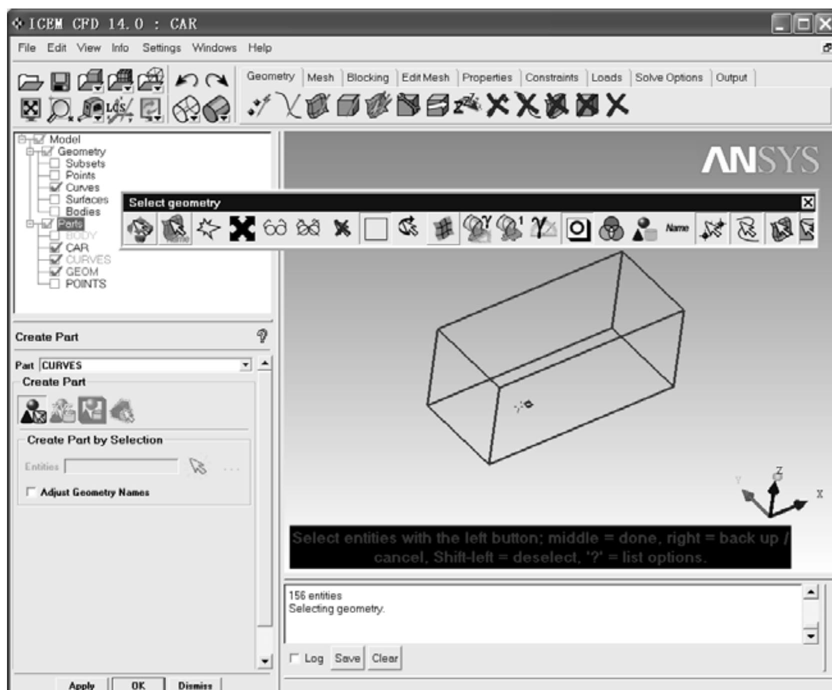


图 4-17　生成 Parts 项中的“CURVES”项

（3）Surfaces 项

勾选“Model”>“Geometry”>“Surfaces”项，取消选择“Model”>“Geometry”下

的其余项。视图区中仅显示出所有曲面。

修改属性栏中“Part”名为“Surface”。单击属性栏中的项，视图区出现“Select geometry”工具条。同样单击“Select geometry”工具条中的按钮，或按〈A〉键，全部选择视图区中不同颜色的所有曲线。

单击中键确认操作，视图区中的所有曲线显示为一种颜色，同时左侧树形菜单栏出现“Model”>“Parts”>“SURFACE”项，如图 4-18 所示。

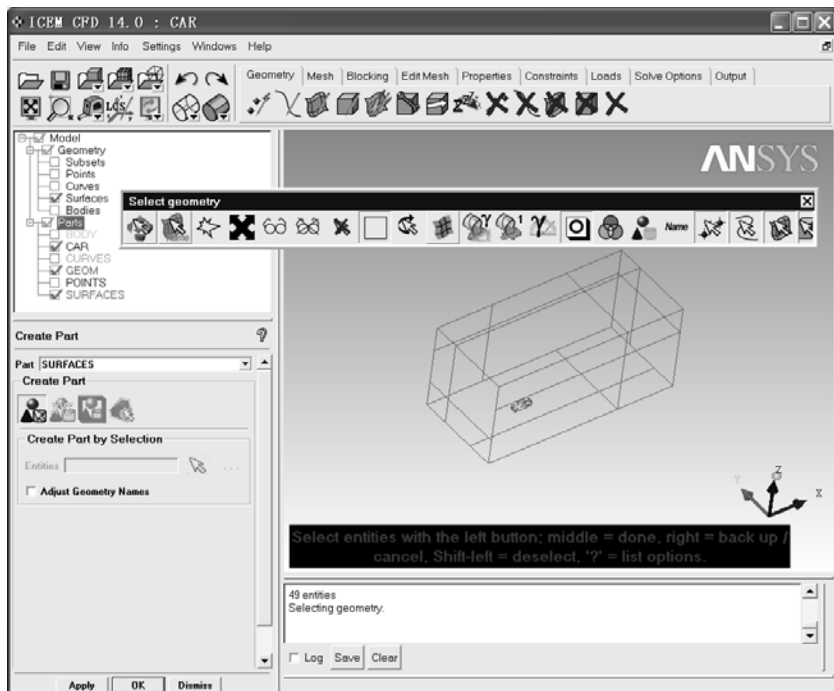


图 4-18 生成 Parts 项中的的“SURFACES”项

（4）进口边界面

保持选择“Model”>“Geometry”>“Surfaces”项。右键单击“Model”>“Parts”，选择“Create Part”项。修改属性栏中“Part”名为“INLET”，选择图 4-19 所示的面作为进口边界，单击中键确认操作。同时左侧树形菜单栏出现“Model”>“Parts”>“INLET”项。

注意：一般选中的面均显示为黑色。

（5）出口边界面

按照以上操作方法，修改属性栏中 Part 名为“OUTLET”，选择图 4-20 所示的面作为出口边界，单击中键确认操作，同时左侧树形菜单栏出现“Model”>“Parts”>“OUTLET”项。

（6）地面边界面

按照以上操作方法，修改属性栏中“Part”名为“GROUND”，选择图 4-21 所示的面作为计算域的地面边界，单击中键确认操作，同时左侧树形菜单栏出现“Model”>“Parts”>“GROUND”项。



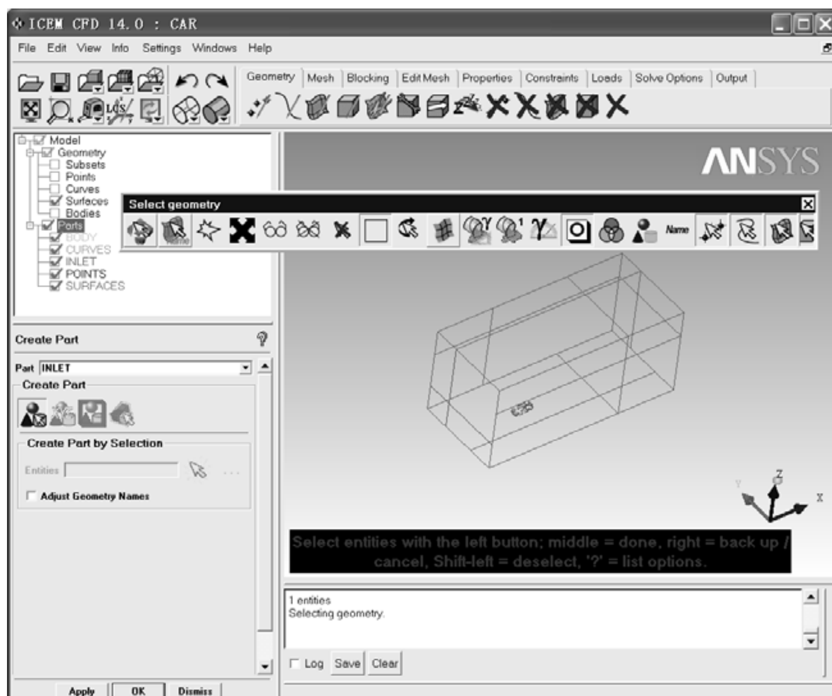


图 4-19　选择进口边界

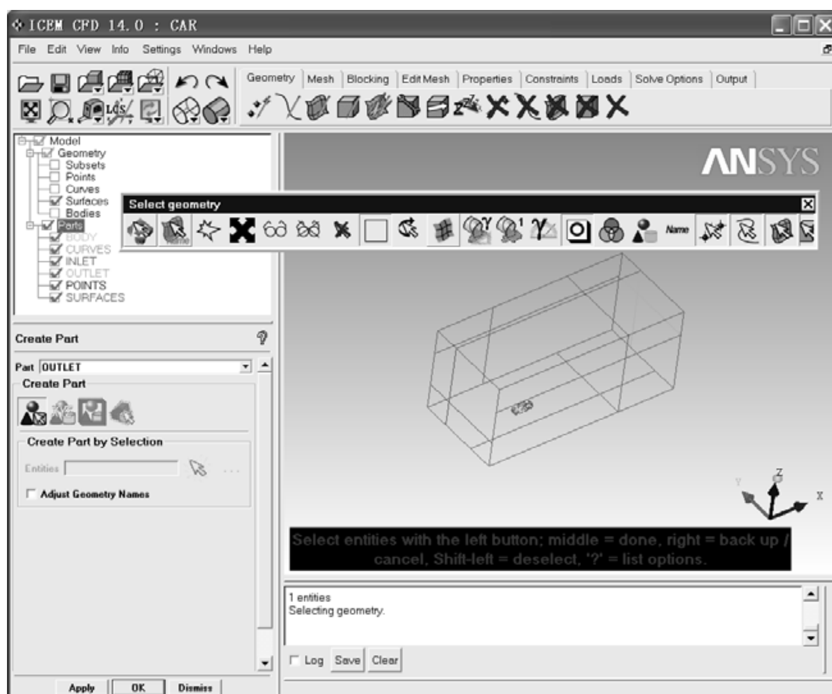


图 4-20　选择出口边界

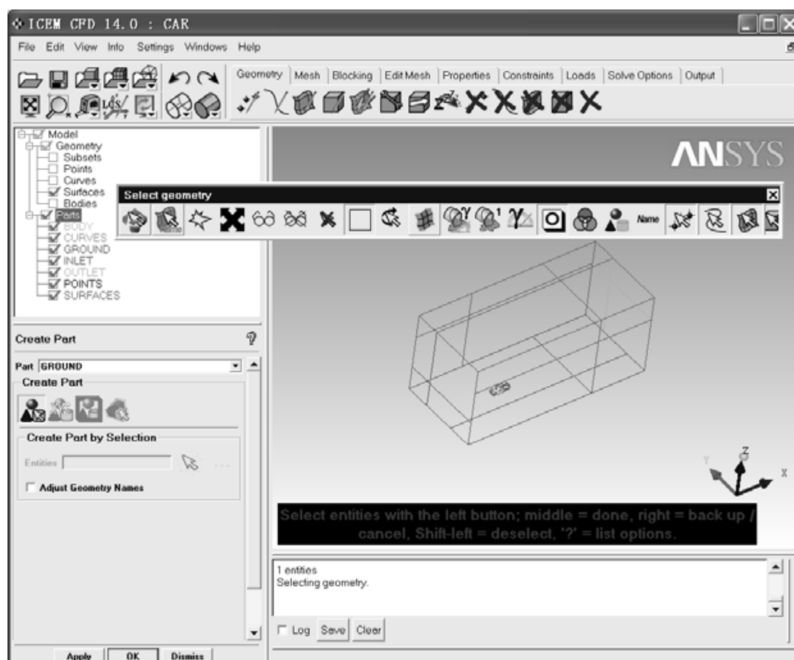


图 4-21　选择地面边界

（7）计算域其他面

修改属性栏中“Part”名为“SIDES”，选择图 4-22 所示的面作为虚拟的计算域表面，单击中键确认操作，同时左侧树形菜单栏出现“Model”>“Parts”>“SIDES”项。

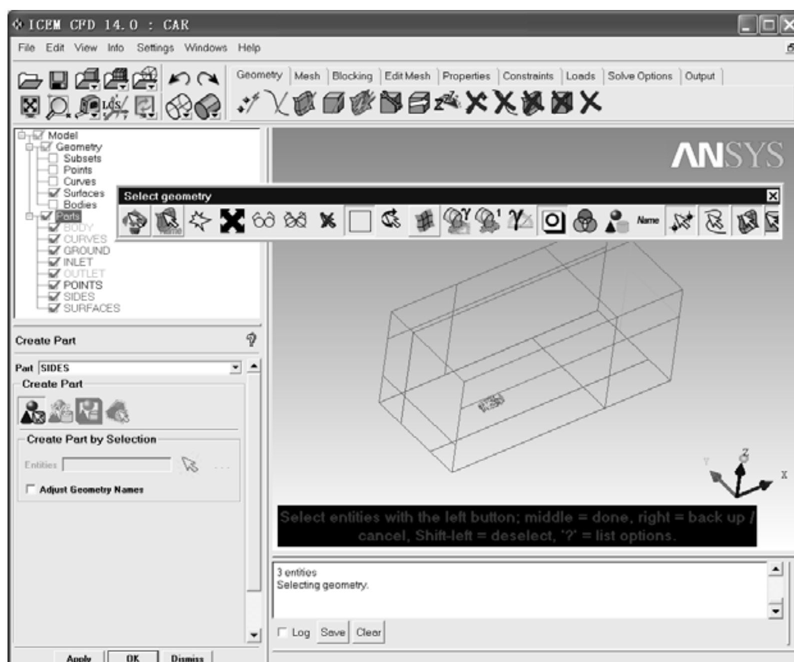


图 4-22　选择计算域其他表面

（8）模型 CAR 设置

仅选择“Model”>“Parts”>“SURFACE”项。修改属性栏中“Part”名为“CAR”，单击属性栏中的项，视图区出现“Select geometry”工具条。同样单击“Select geometry”工具条中的按钮，或按〈A〉键，选择图 4-23 中的所有面作为车体表面，单击中键确认操作。

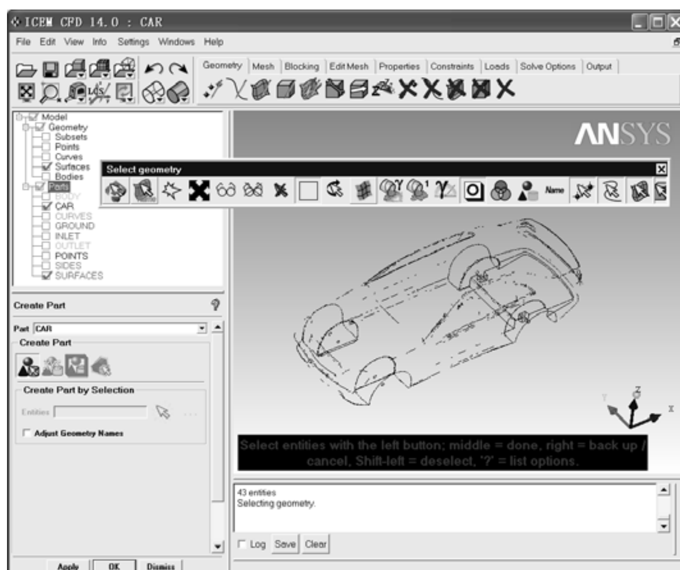


图 4-23 汽车模型设定

同时将“Model”>“Parts”>“SURFACE”项更名为“Model”>“Parts”>“CAR”项。

（9）Parts 项创建完成

以上操作完成后，所有 Part 项创建完成，如图 4-24 所示，其中包含了计算域边界设置。

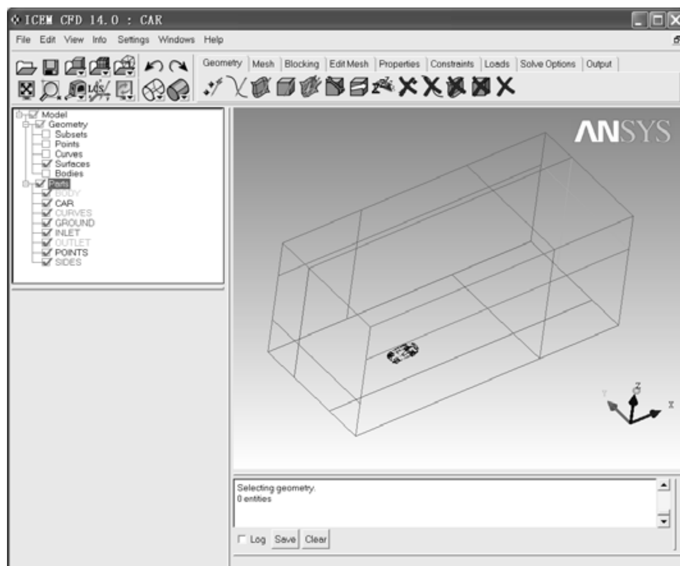


图 4-24 所有 Part 项创建完成

4.2.6 面网格划分

1）选择工具栏命令“Mesh”>“Global Mesh Setup”（按钮），选择属性栏中的“Global Mesh Parameters”命令（按钮）。

如图 4-25 所示，保持“Global Element Scale Factor”项值为“1.0”，在“Global Element Seed Size”项中输入“1000.0”（软件默认网格尺寸按 mm 计），选中“Display”选项，可以预览网格的大小。单击“OK”按钮确认操作。

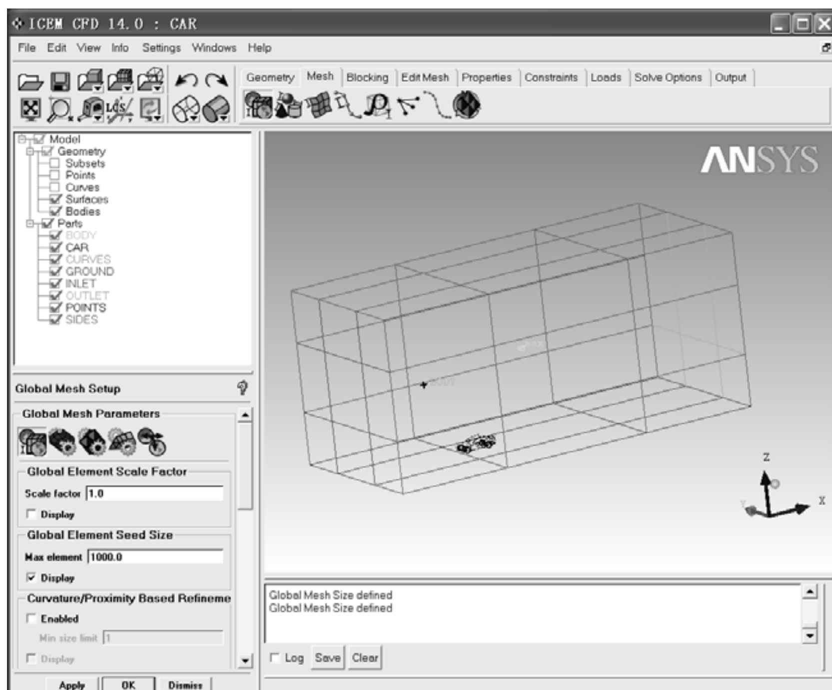


图 4-25 输入网格总体尺寸

2）输入各边界表面最大尺寸。如图 4-26 所示，选择工具栏命令“Mesh”>“Part Mesh Setup”（按钮），在弹出的“Part Mesh Setup”对话框的“max size”一栏中输入各 part 的最大尺寸，除“CAR”项要求车体表面网格最大为“20”外，其余项均输入“1000”，单击“Apply”按钮确认操作。

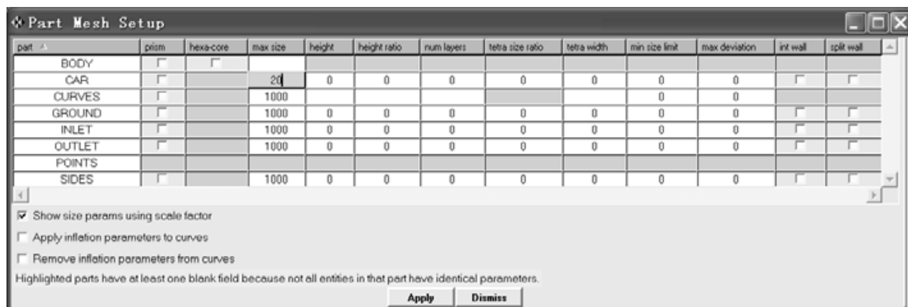


图 4-26 输入各边界表面最大尺寸

单击“Dismiss”按钮返回。

3）进行网格划分。如图 4-27 所示，选择工具栏命令“Mesh”>“Compute Mesh”（ 按钮），在属性栏中采用默认的“Tetra/Mixed”网格划分方式，单击“Compute”按钮开始划分网格。右下角的进度条显示网格划分进度。

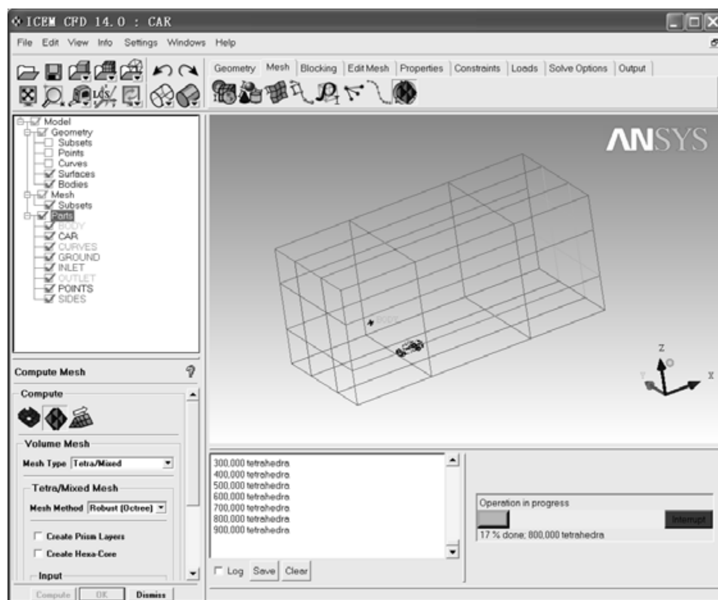


图 4-27 划分网格

4）网格划分完毕后，软件右下角的代码输出区显示网格量约为 300 万个，如图 4-28 所示。

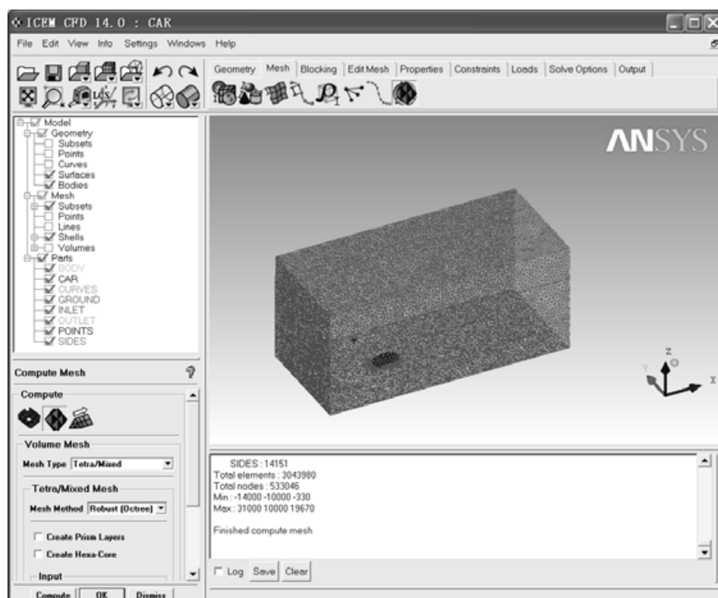


图 4-28 显示网格数量

4.2.7 网格质量检查

1）选择工具栏命令“Mesh”>“Edit Mesh”>“Check Mesh”（按钮），进行网格质量检查，可以选择检查任何可能存在的错误和问题，如图 4-29 所示。

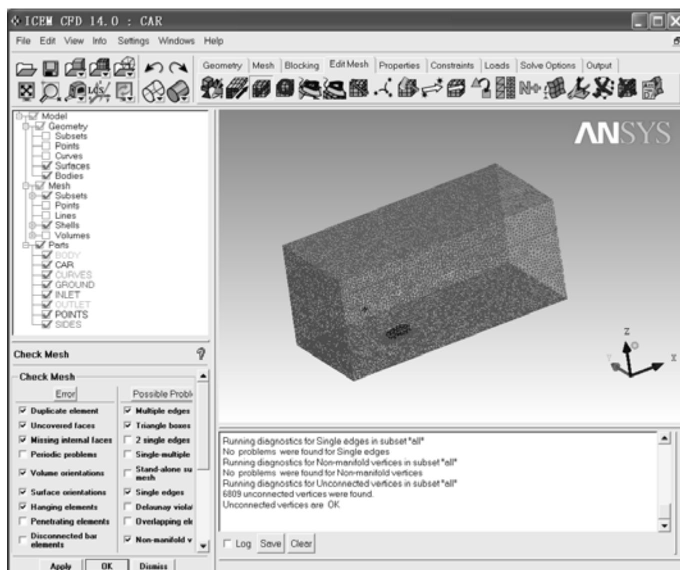


图 4-29　检查网格质量

2）显示网格质量。如图 4-30 所示，选择工具栏“Edit Mesh”>“Display Mesh Quality”（按钮）。在属性栏中“Quality type”中选择“Quality”项，然后单击“Apply”按钮，在软件右下角可以看到体网格质量分布，单击质量分布条框可以从视图中看出哪些位置的网格质量差，同时从属性栏中可以看出该质量下的网格数量。

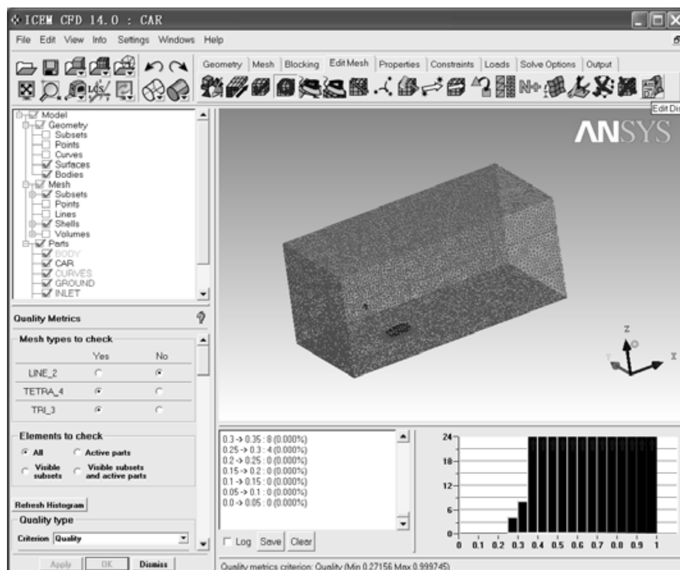


图 4-30　显示网格质量

3）不同网格质量显示。取消选择“Mesh”下的所有项，单击网格质量柱状图中的任意柱形，即可在视图中显示该质量下的网格，同时在代码输出区可以清楚的得到该质量下的网格数量，如图 4-31 所示。

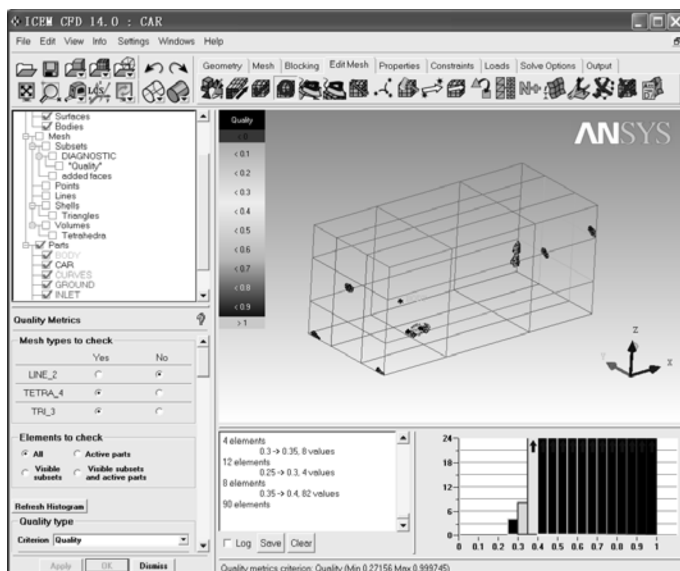


图 4-31　不同网格质量显示

4）进行网格光顺，以提高网格质量。如图 4-32 所示，选择工具栏“Edit Mesh”>“Smooth Mesh Globally”命令（按钮）。在属性栏中单击“Apply”按钮，在软件右下角可以看到光顺后的体网格质量分布情况。（注意：由于本章网格质量较好，光顺后网格质量提升不明显，读者可根据实际需求选择是否进行网格光顺或者提高光顺值，即属性栏中的“Up to value”，以得到更好的体网格）。

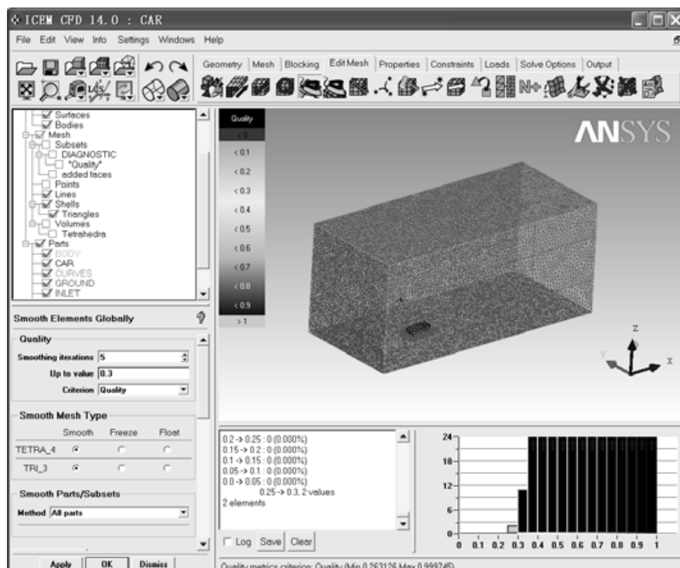


图 4-32　网格光顺

5）网格切面显示。右键单击“Mesh”按钮，选择“Cut Plane”项，创建“Manage Cut Plane”，如图 4-33 所示。在属性栏中选择“Method”为“by Coefficients”，沿 *y* 轴做切面，单击“Apply”按钮，如图 4-34 所示。

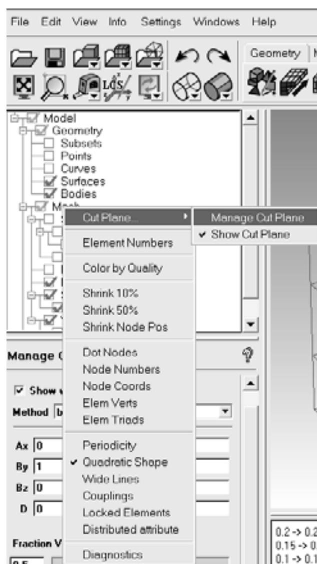


图 4-33 创建“Manage Cut Plane”

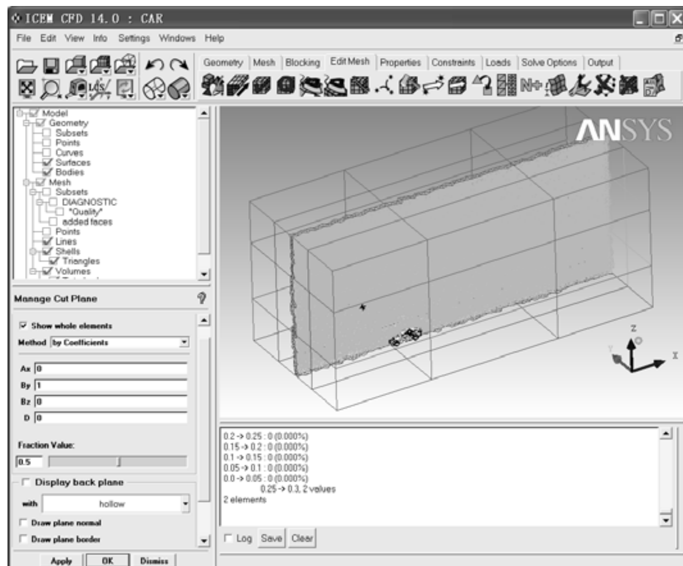


图 4-34 设定“Manage Cut Plane”属性

4.2.8 输出网格

1）选择网格输出格式。选择工具栏命令“Output”>“Solver Setup”（按钮），在属性栏中选择“Output Solver”项为“Fluent_V6”，选择“Common Structural Solver”项为“NASTRAN”，如图 4-35 所示，单击“OK”按钮确认操作。

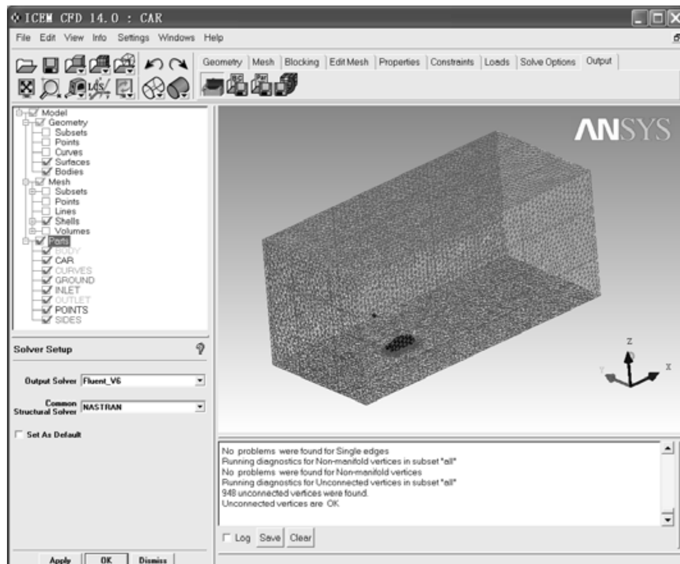


图 4-35 选择网格输出格式

2）选择工具栏命令“Output”>“Solver Setup”（按钮），弹出图 4-36 所示的对话框，单击“Yes”按钮确认保存。

3）选择打开对应的“CAR.uns”文件，如图 4-37 所示。

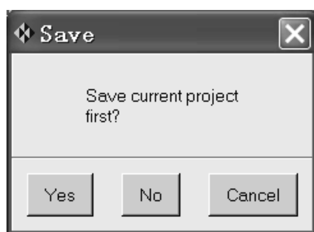


图 4-36　保存文件

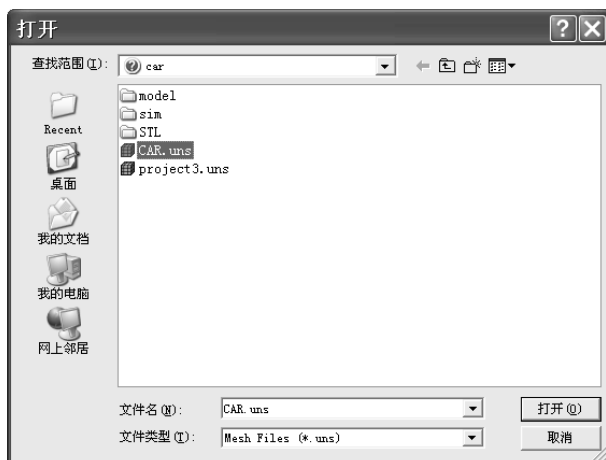


图 4-37　选择对应的“CAR.uns”文件

4）在“Fluent V6”对话框中中将“Output file”名字改为“CAR”，如图 4-38 所示。单击“Done”按钮确认保存。在 E:/car 目录下可以找到网格文件“CAR.msh”。

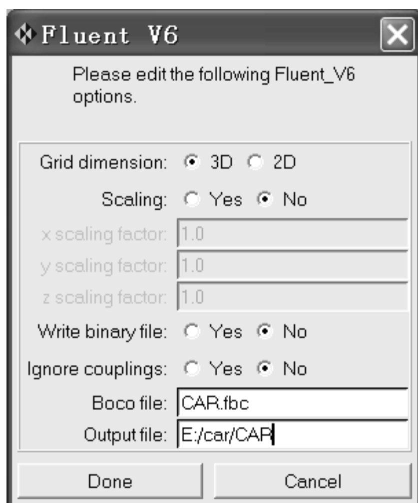


图 4-38　输入导出网格文件名

4.3　模型设置

4.3.1　导入网格模型

1）启动 FLUENT 软件。选择“开始”菜单，打开 FLUENT 软件启动界面，选择“并行

计算->6 核”方式，如图 4-39 所示。

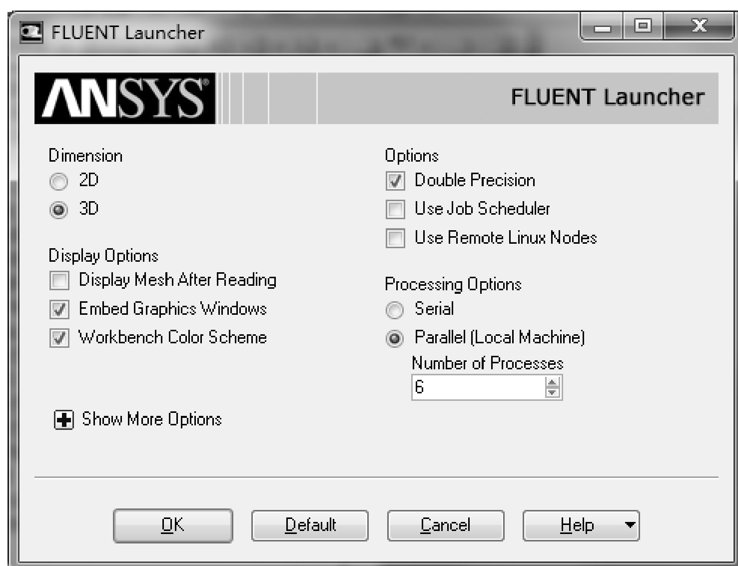


图 4-39　选择并行计算方式

2）导入网格文件。选择菜单项“File”>“Read”>“Mesh...”导入网格，如图 4-40 所示。

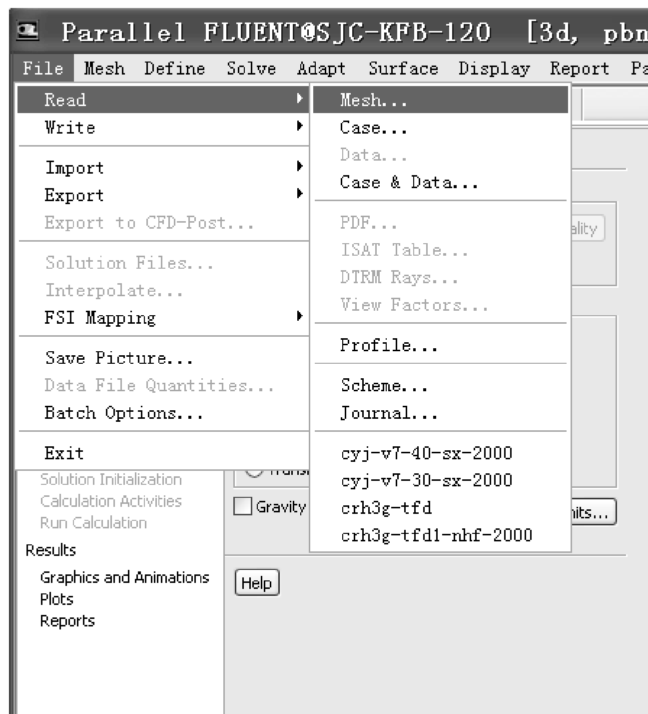


图 4-40　导入网格

选择网格文件“CAR.msh”，单击“OK”按钮打开该网格文件，如图 4-41 所示。



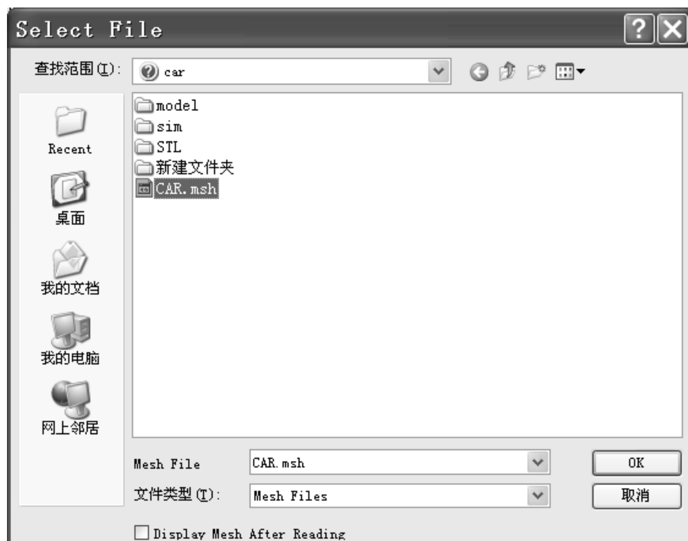


图 4-41　选择网格文件

3）显示网格。选择菜单项“Display”>“Mesh...”，打开“Mesh Display”对话框。如图 4-42 所示，单击“Mesh Display”对话框中的“Display”按钮，视图区出现计算模型的网格，单击“Close”按钮退出。

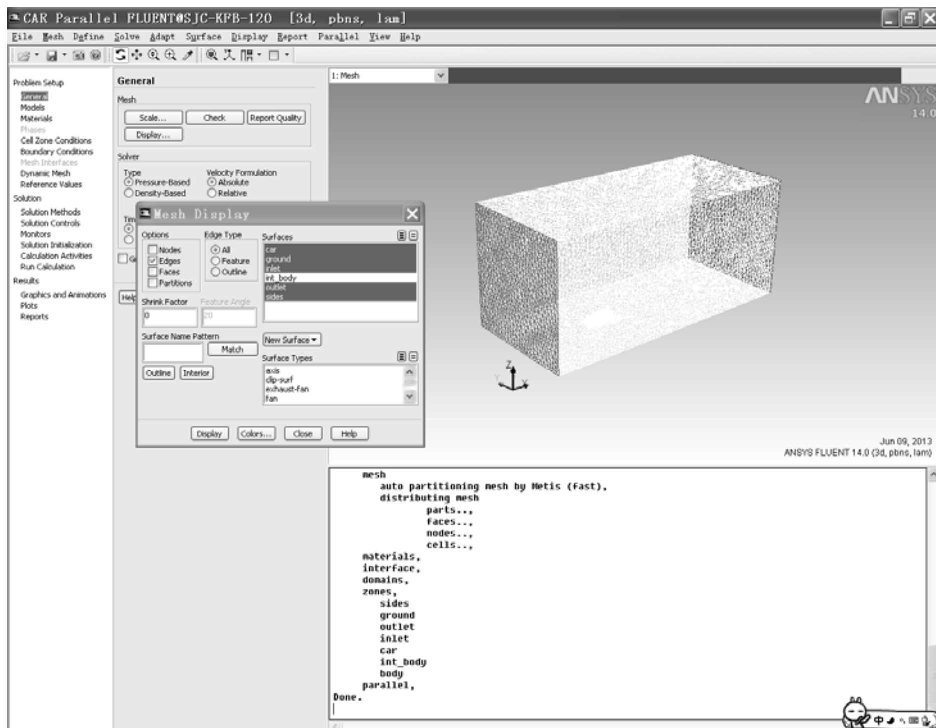


图 4-42　显示网格

4）缩放模型比例。选择左侧项目树“Problem Setup”>“General”项属性栏中的

“Scale...”选项，弹出图 4-43 所示的“Scale Mesh”对话框。

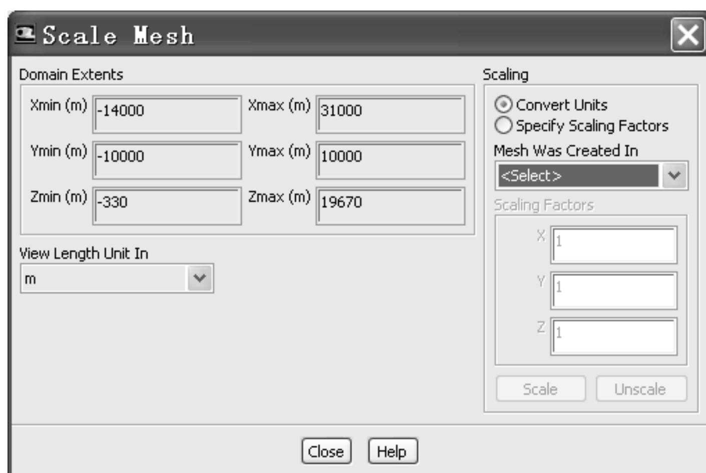


图 4-43 “Scale Mesh”对话框

从图中可以看出，整体尺寸放大了 1000 倍。这是由于 ICEM 软件划分网格时采用的默认单位是 mm，而 FLUENT 采用的默认单位是 m。因此，此处需要对网格进行缩放。

选择缩放单位。如图 4-44 所示，将对话框右侧的“Mesh Was Created In”项设置为“mm”，“Scaling Factors”下的各项值则相应地由“1”改变为“0.001”。

单击“Scale”按钮，计算域的坐标范围变换为图 4-44 所示的形式。单击“Close”按钮退出。

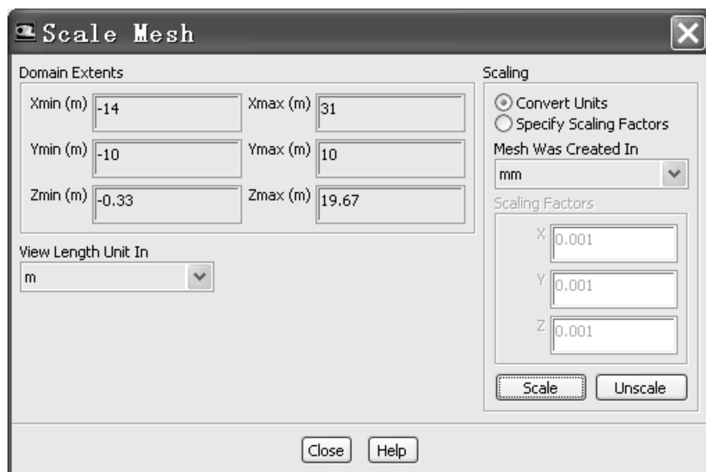


图 4-44 选择缩放单位缩放模型

5）网格质量检查。在 ICEM-CFD 软件中可对网格质量进行检查，同样的，在 FLUENT 软件中也可以检查网格质量，主要是检查是否有负体积网格。选择左侧项目树“Problem Setup”>“General”项属性栏中的“Check”选项，在下述信息栏中显示出最大及最小体网格，如图 4-45 所示。

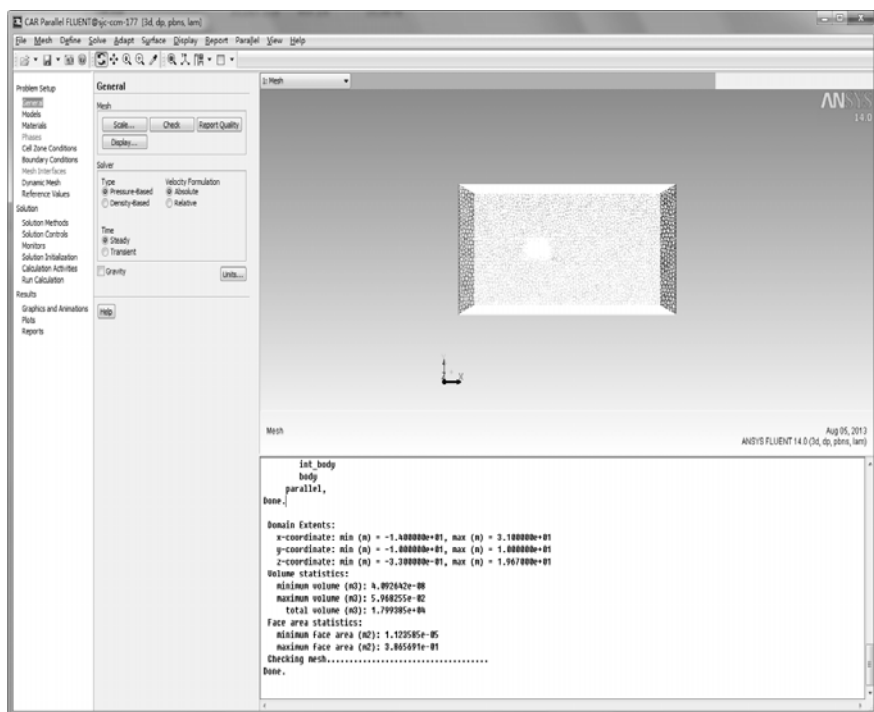


图 4-45　网格质量检查

4.3.2 设置计算模型

1）默认选择“Problem Setup”>“General”项属性栏中的各项设置。

2）更改湍流模型。选择“Problem Setup”>“Models”项，双击其属性栏中的“Viscous-Laminar”项，如图 4-46 所示。

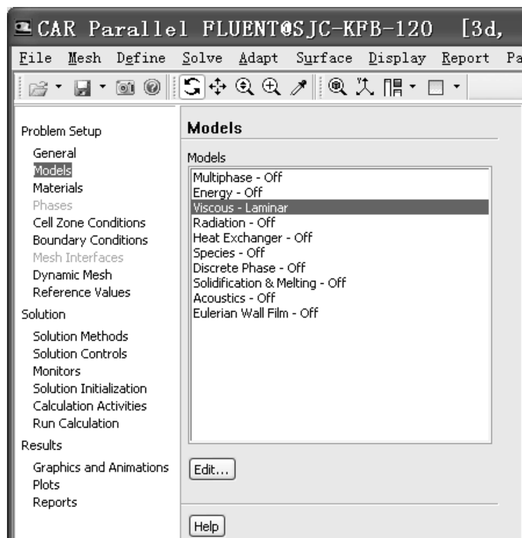


图 4-46　选择湍流模型

在打开的“Viscous Model”对话框中，选择“k-epsilon(2 eqn)”项，对话框展开为图 4-47 所示的形式。保持默认设置，单击“OK”按钮返回。

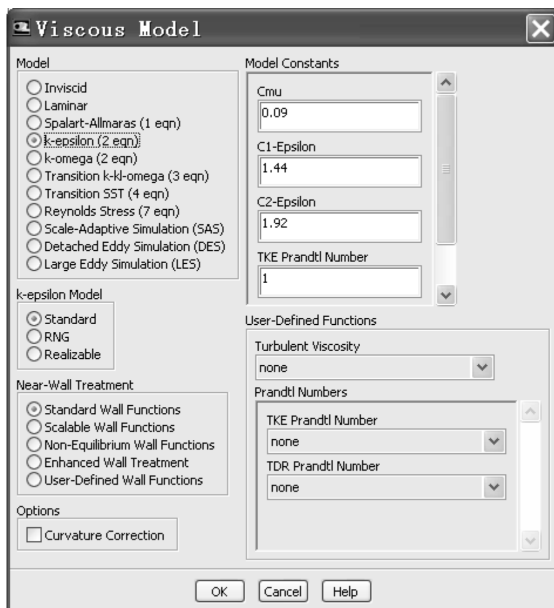


图 4-47 选择选择“k-epsilon(2 eqn)”模型

3）保持“Problem Setup”>“Materials”和“Problem Setup”>“Cell Zone Conditions”两项的属性栏设置不变。

4.3.3 设置边界条件

1）设置进口边界条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“inlet”边界，软件默认其为“velocity-inlet”条件。

单击“Edit...”按钮，在弹出的“Velocity Inlet”对话框中，输入速度值为“30”，如图 4-48 所示。单击“OK”按钮退出。

2）设置出口边界条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“outlet”边界，将其设置为“Pressure Outlet”条件。在图 4-49 所示的“Pressure Outlet”对话框中保持默认设置，然后单击“OK”按钮返回。

3）设置计算域壁面条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“sides”边界，将其设置为“wall”条件。在图 4-50 所示的“Wall”对话框中选择“Specified Shear”项并设置“Roughness Constant”值为“0”，然后单击“OK”按钮返回。

4）设置地面滑移条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“ground”边界，将其设置为“wall”条件。在图 4-51 所示的“Wall”对话框中选择“Moving Wall”项，默认选择“Translational”方式，并设置“Speed（m/s）”为“30”，设置“Direction”值为“1，0，0”，单击“OK”按钮返回。（根据相关文献，地面一般采用滑移和非滑移两种情况进行对比，本例采用滑移边界条件作为地面的边界条件，读者可根据自己的需求设置不同的边界条件，分析不同边界条件对计算结果的影响。）

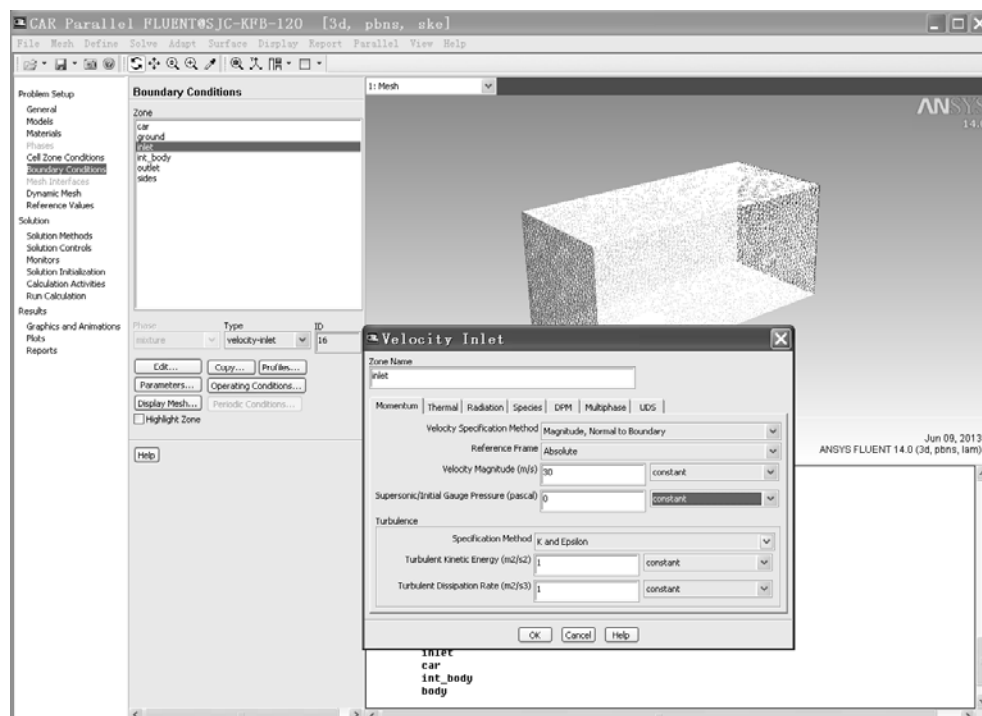


图 4-48　设置入口边界条件

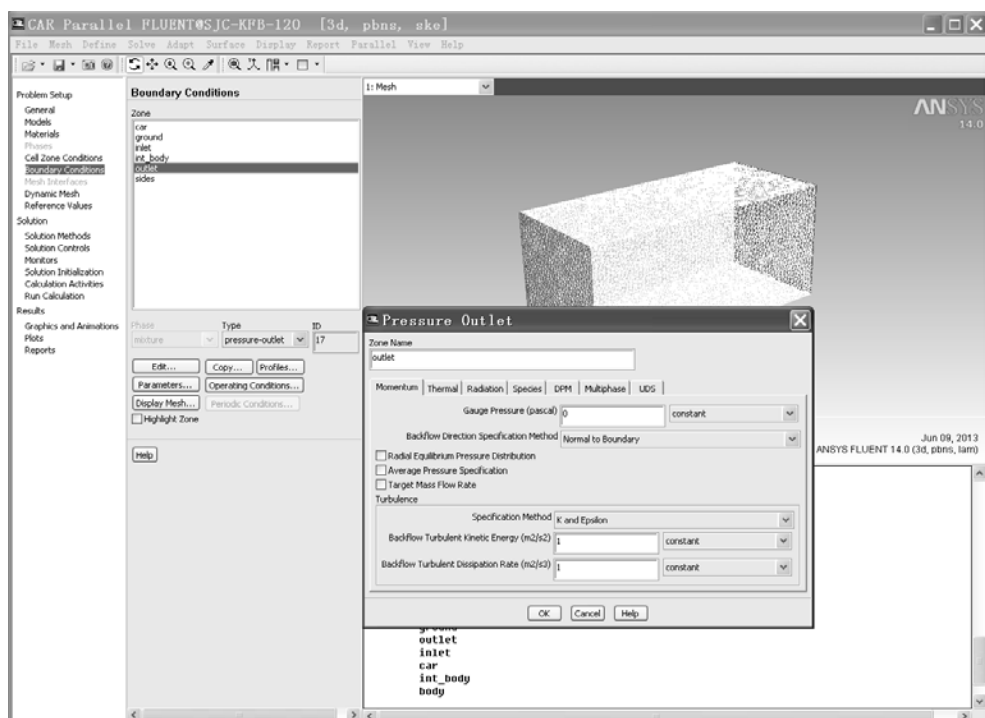


图 4-49　设置出口边界条件

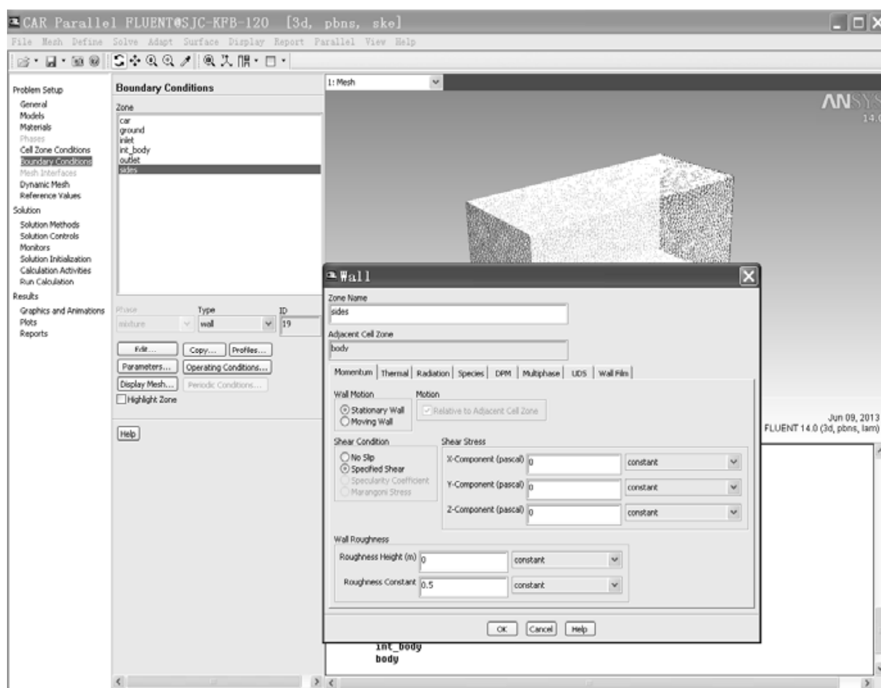


图 4-50　设置计算域壁面条件

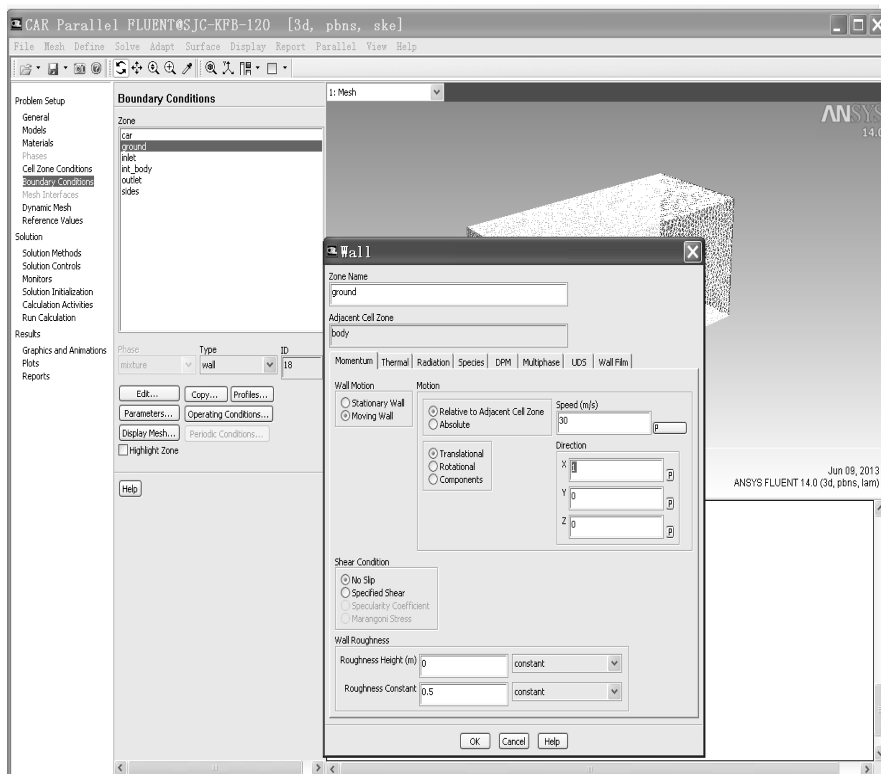


图 4-51　设置地面滑移条件

5）设置小汽车表面边界条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“car”边界，将其设置为“wall”条件。在图 4-52 所示的“Wall”对话框中选择“No Slip”项，保持默认设置，然后单击“OK”按钮返回。

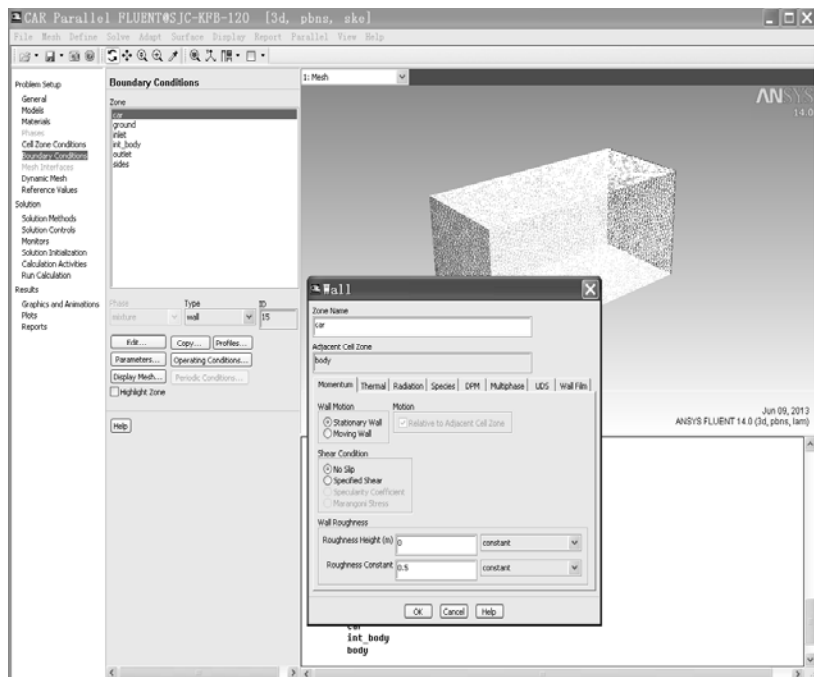


图 4-52　设置小汽车表面条件

6）设置计算参考数值。选择“Problem Setup”>“Reference Values”选项，设置“Compute from”项为“inlet”，经过测量，小汽车的迎风面积约为 $2m^2$，在设置参考值“Area（m^2）”处设置为“2”，设置“Reference Zone”项为“body”，如图 4-53 所示。其余设置默认不变。

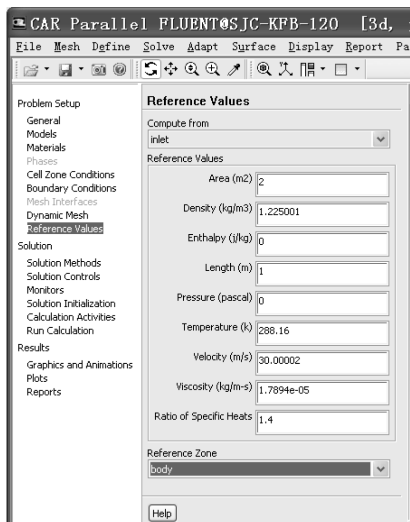


图 4-53　设置计算参考数值

4.4 模型求解

1）选择“Solution”>“Solution Methods”和“Solution”>“Solution Controls”两项设置不变。

2）设置气动阻力监测曲线。选择“Solution”>“Monitors”项，单击“Create”下“Drag”项，打开“Drag Monitor”对话框。如图 4-54 所示，勾选“Plot”项，“Window”编号自动设置为“2”（残差曲线窗口编号默认为 1）。选择“Wall Zones”栏中的“car”边界，“Force Vector”设置采用默认的“1，0，0”，即监测汽车运行时所受阻力。单击“OK”按钮返回。

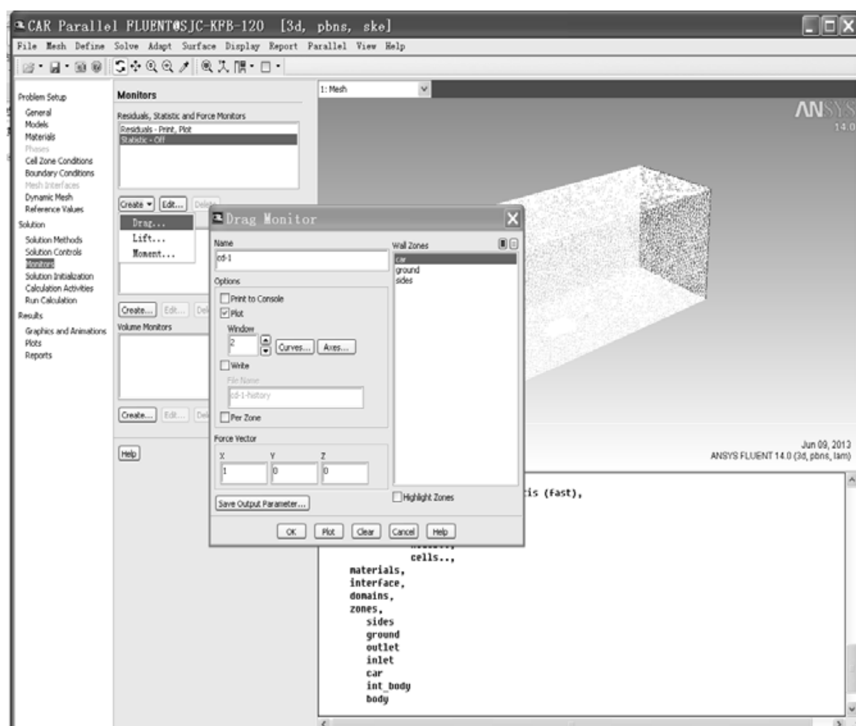


图 4-54 设置气动阻力监测曲线

3）设置气动升力监测曲线。选择“Solution”>“Monitors”项，单击“Create”下“Lift”项，打开“Life Monitor”对话框。如图 4-55 所示，勾选“Plot”项，“Window”编号自动设置为“3”（残差曲线窗口编号默认为 1）。选择“Wall Zones”栏中的“car”边界，将“Force Vector”设置更改为“0，0，1”，即监测汽车运行时所受阻力。单击“OK”按钮返回。

4）初始化。选择“Solution”>“Solution Initialization”项，将其属性栏“Compute from”项设置为“inlet”边界，其余设置不变，如图 4-56 所示。单击“Initialize”按钮，进行计算项目的初始化。若在此处步进行初始化，在计算时，会提示需进行初始化。

5）设置自动保存。在“Calculation Activities”>“Calculation Activities”项中设置 1000 步自动保存一次，如图 4-57 所示。

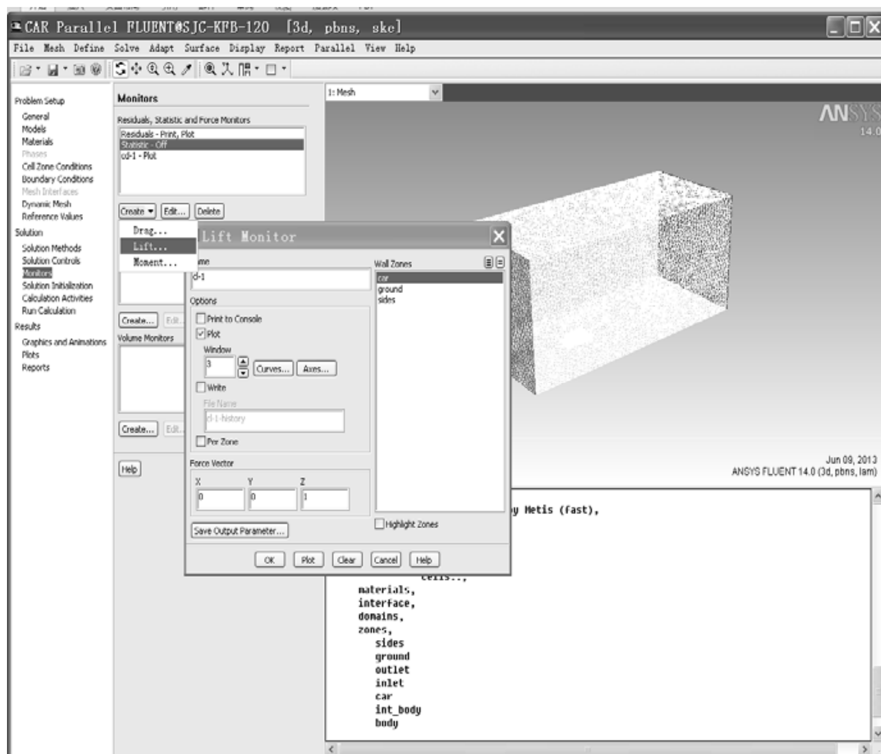


图 4-55　设置气动升力监测曲线

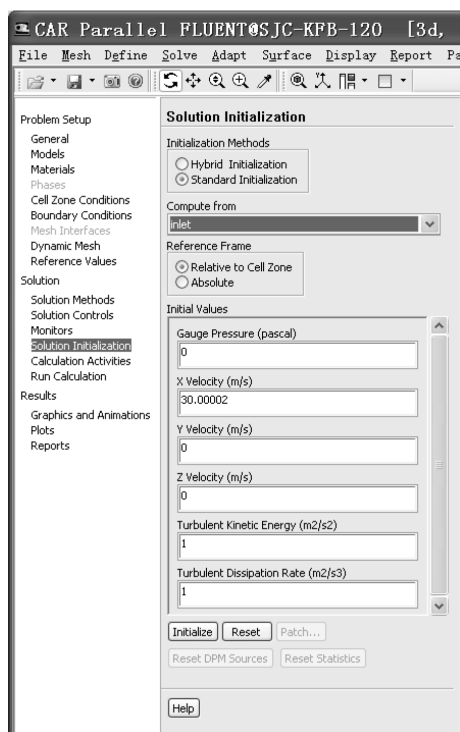


图 4-56　初始化计算项目

6）设置迭代步数。选择“Solution”>“Run Calculation”项，将其属性栏中“Number of Iterations”项设置为“1000”，如图 4-58 所示。

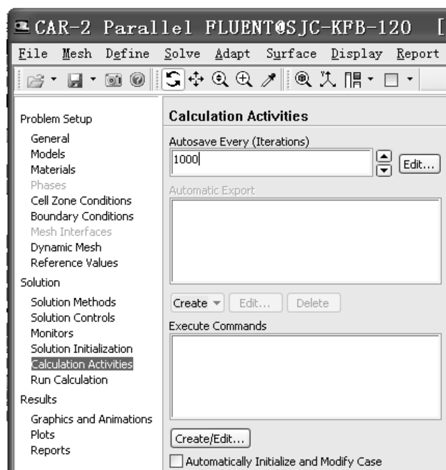


图 4-57 自动保存设置

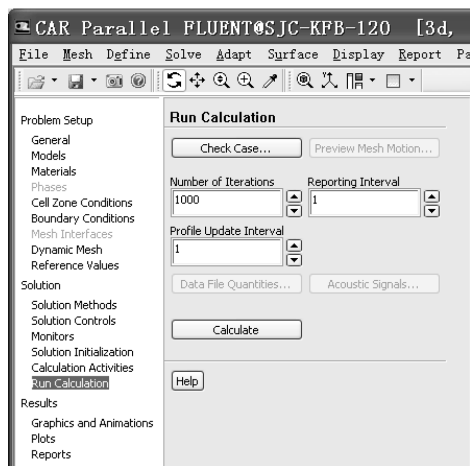
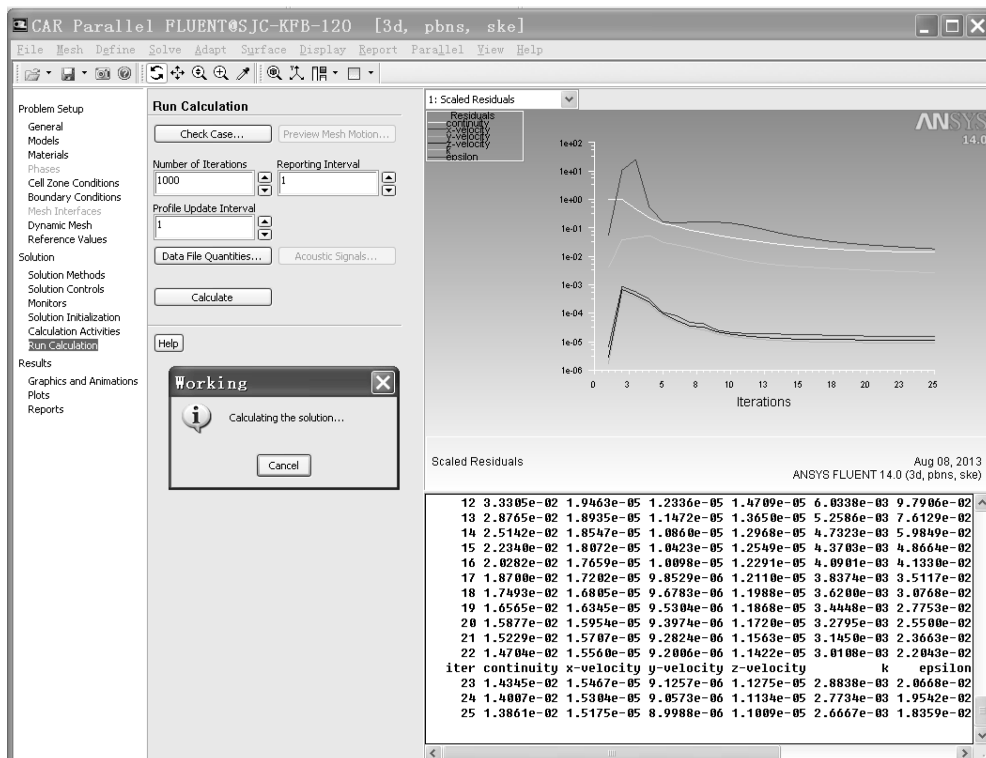


图 4-58 设置迭代步数

7）计算。单击“Calculate”按钮，进行计算。

计算过程中，视图区的残差曲线图和右下侧脚本区随时根据迭代步数及计算结果进行更新，如图 4-59 所示。用户可以在图中对三个曲线图进行切换。




```
  12 3.3305e-02 1.9463e-05 1.2336e-05 1.4709e-05 6.0338e-03 9.7906e-02
  13 2.8765e-02 1.8935e-05 1.1472e-05 1.3650e-05 5.2586e-03 7.6129e-02
  14 2.5142e-02 1.8547e-05 1.0860e-05 1.2968e-05 4.7323e-03 5.9849e-02
  15 2.2340e-02 1.8072e-05 1.0423e-05 1.2549e-05 4.3703e-03 4.8664e-02
  16 2.0282e-02 1.7659e-05 1.0098e-05 1.2291e-05 4.0901e-03 4.1330e-02
  17 1.8700e-02 1.7202e-05 9.8529e-06 1.2110e-05 3.8374e-03 3.5117e-02
  18 1.7493e-02 1.6805e-05 9.6783e-06 1.1988e-05 3.6200e-03 3.0768e-02
  19 1.6565e-02 1.6345e-05 9.5304e-06 1.1868e-05 3.4448e-03 2.7753e-02
  20 1.5877e-02 1.5954e-05 9.3974e-06 1.1720e-05 3.2795e-03 2.5500e-02
  21 1.5229e-02 1.5707e-05 9.2824e-06 1.1563e-05 3.1450e-03 2.3663e-02
  22 1.4704e-02 1.5560e-05 9.2006e-06 1.1422e-05 3.0108e-03 2.2043e-02
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity          k    epsilon
  23 1.4345e-02 1.5467e-05 9.1257e-06 1.1275e-05 2.8838e-03 2.0668e-02
  24 1.4007e-02 1.5304e-05 9.0573e-06 1.1134e-05 2.7734e-03 1.9542e-02
  25 1.3861e-02 1.5175e-05 8.9988e-06 1.1009e-05 2.6667e-03 1.8359e-02
```

图 4-59 残差曲线图



8）计算完成后，“Information”对话框会显示计算完成的信息，如图 4-60 所示。单击“OK”按钮确认。注意，计算收敛的判据是各残差曲线趋于稳定，因此设置收敛标准应视残差曲线的稳定情况而定。在计算中，可根据实际需要设置收敛判据。

具体操作为：选择“Solution”>“Monitors”项，双击“Residuals”项，打开“Residual Monitor”对话框。将“Equations”栏所有项的“Absolute Criteria”（收敛标准）由 0.001 修改为实际需要值，如图 4-61 所示。

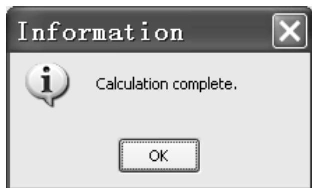


图 4-60　计算完成

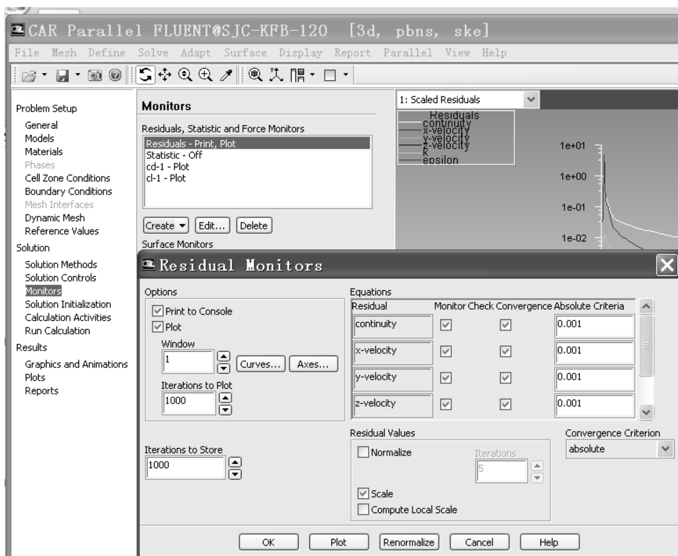


图 4-61　修改收敛判据

4.5　后处理

FLUENT 软件的计算结果有两种后处理方式，一是采用 FLUENT 后处理工具，其集成在 FLUENT 软件中，二是采用 ANSYS CFD-Post，它是 ANSYS CFD 产品的新一代后处理工具，可单独运行或在 Workbench 下运行。两种后处理都包含了分析 CFD 结果的许多工具。

4.5.1 FLUENT 自带后处理

FLUENT 软件自带后处理软件，可以进行计算结果后处理分析，如计算结果统计、等值面、速度矢量图、压力云图、流线图、动画等。可通过软件菜单栏上的 Adapt、Surface、Display、Report 下的相关功能来实现，如图 4-62 所示。

在本次算例中，将采用 CFD-Post 进行后处理，在 FLUENT 自带后处理模块中仅对关注的气动力系数进行统计，具体操作如下。

计算完成后，可在 FLUENT 软件中统计关注的气动力及气动力系数，如计算列车所受气动阻力。选择“Results”>“Reports”项，双击右侧的“Forces”项，出现“Force Reports”对话框。默认选择“Options”栏中的“Forces”项，设置“Direction Vector”为“1，0，0”，并选择“Wall Zones”栏中的“car”边界。

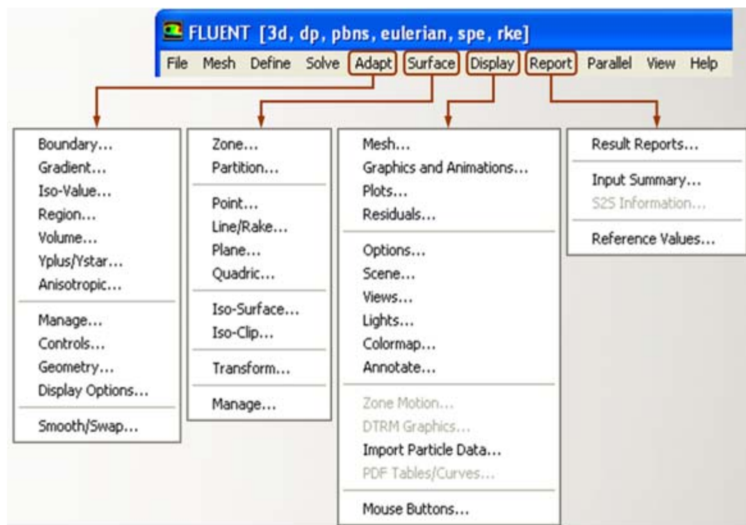


图 4-62　FLUENT 软件后处理工具栏

单击“Print”按钮，软件右下侧输出各项计算结果，如图 4-63 所示。

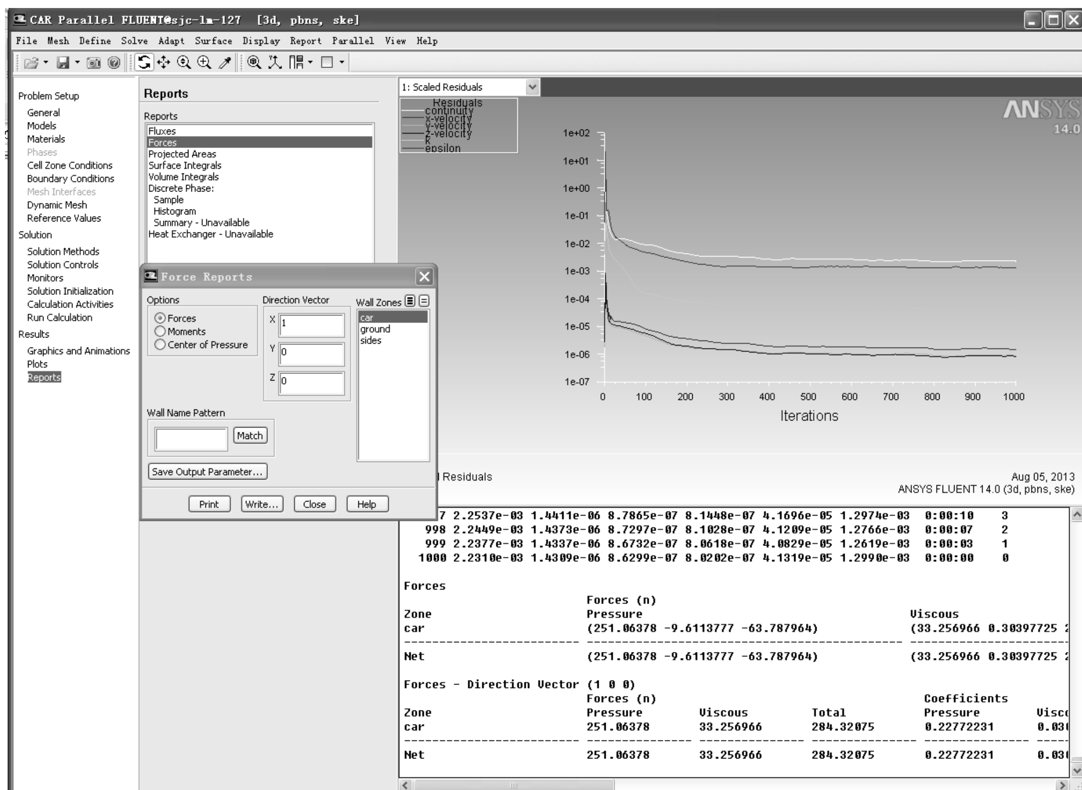


图 4-63　气动阻力结果

可以看出，小汽车所受气动阻力为 284N，其中压差阻力（Pressure）为 251N，摩擦阻力（Viscous）为 33N，同时输出了各项阻力对应的阻力系数，可通过拖动条查询相关数据。

4.5.2 CFD-Post 后处理

上节提到，在 FLUENT 软件中，可以进行压力云图、速度矢量图等结果处理。本例中着重介绍采用 CFD-Post 软件进行以上形式的后处理。

1）启动 CFD-Post 软件

导入 Fluent 软件计算结果文件。选择菜单项“File”>“Load Results...”，选择文件名“CAR.cas”，单击“Open”按钮，如图 4-64 所示。

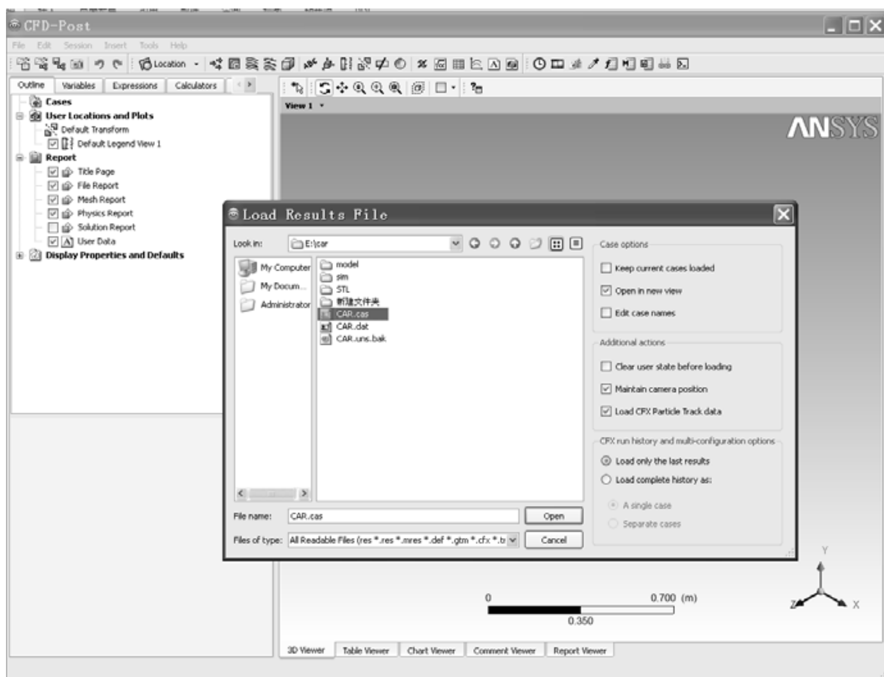


图 4-64 导入计算结果文件

在弹出的“Global Variable Ranges”对话框中，单击“OK”按钮确认操作，如图 4-65 所示。

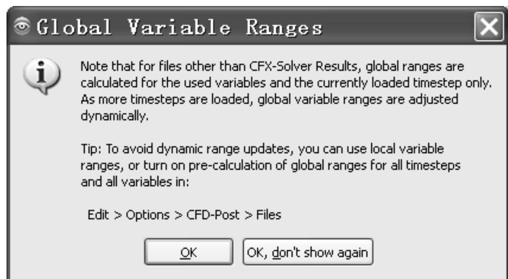


图 4-65 “Global Variable Ranges”对话框

2）创建列车表面压力云图

① 单击工具栏上的“contour”项（按钮），输入文件名“car surface”，单击“OK”按钮，如图 4-66 所示。

② 压力云图属性栏展开。将“Location”项设置为“car”边界，将“Range”项设置为“Local”，将“# of Contours”项设置为“100”，单击“Apply”按钮，视图区中列车表面压力云图如图 4-67 所示。从图中可以看出，表面压力在前端最高，然后沿变截面区域不断降低，后端面处压力最低。前部正压值较大，尾部负压值较大，正负压差是引起汽车运行阻力的重要因素。

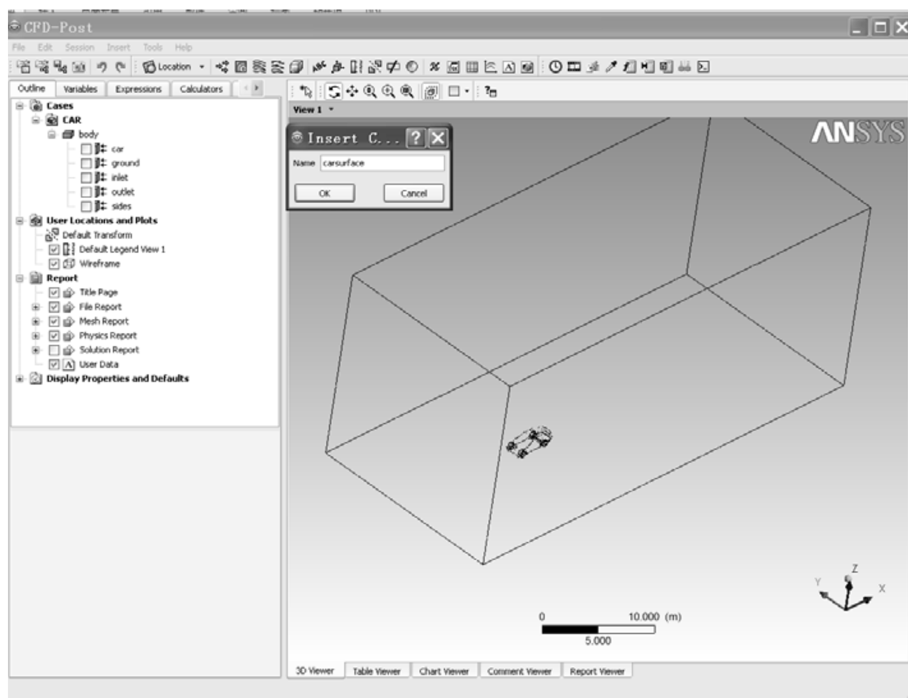


图 4-66　创建压力云图

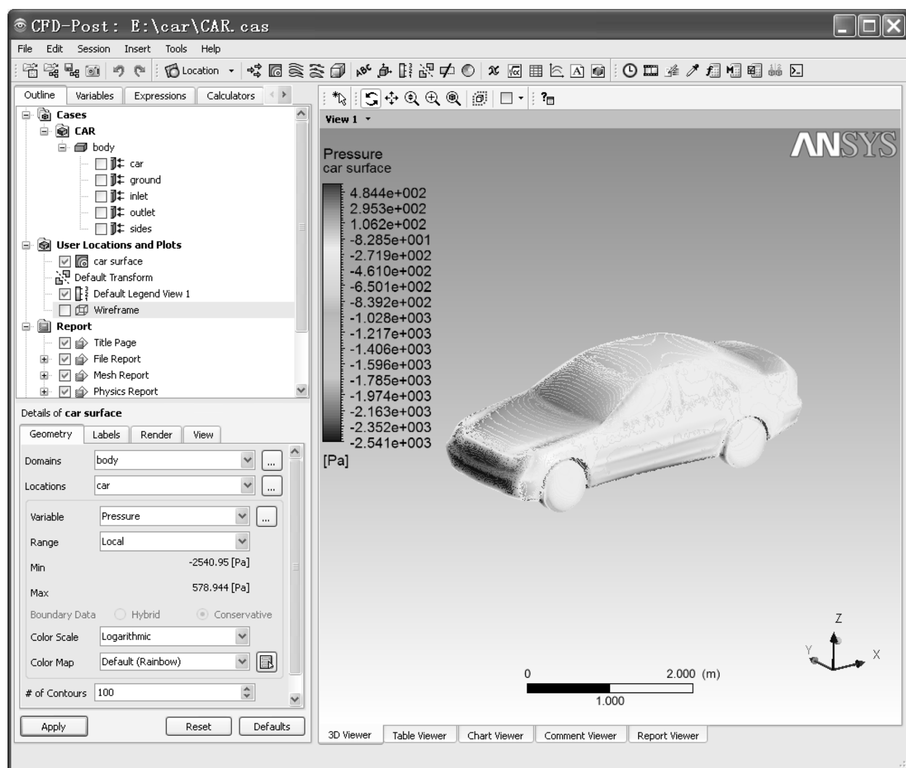


图 4-67　设置压力云图属性

3）创建速度矢量图

① 创建截面。选择工具栏“Location”>“Plane”项，创建截面，如图 4-68 所示。输入文件名“midplane”，如图 4-69 所示。

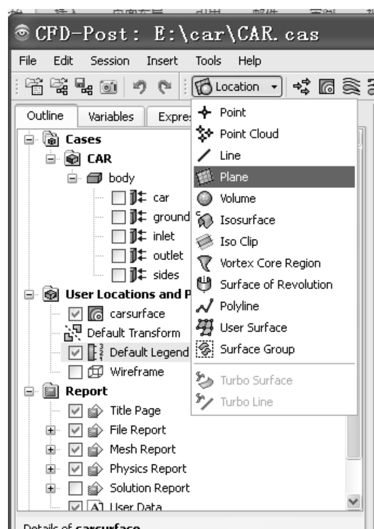


图 4-68　创建截面速度矢量图



图 4-69　输入文件名

② 在“mid plane”截面属性栏中选择“Method”项为“ZX Plane”，单击“Apply”按钮，视图区中创建好的截面如图 4-70 所示。

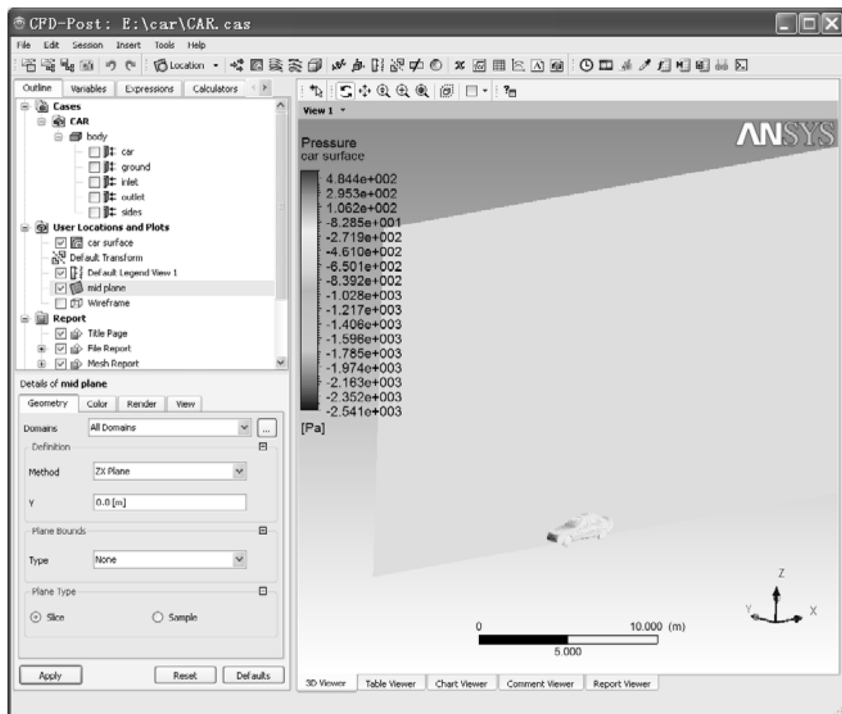


图 4-70　设置截面属性

③ 显示速度矢量图。单击工具栏上的按钮，输入文件名“Vector 1”，在其属性栏中设置“Locations”为“midplane”，同时取消选择“Outline”Tab 页下的“midplane”项，单击“Apply”按钮，视图区中创建好的速度矢量图如图 4-71 所示。

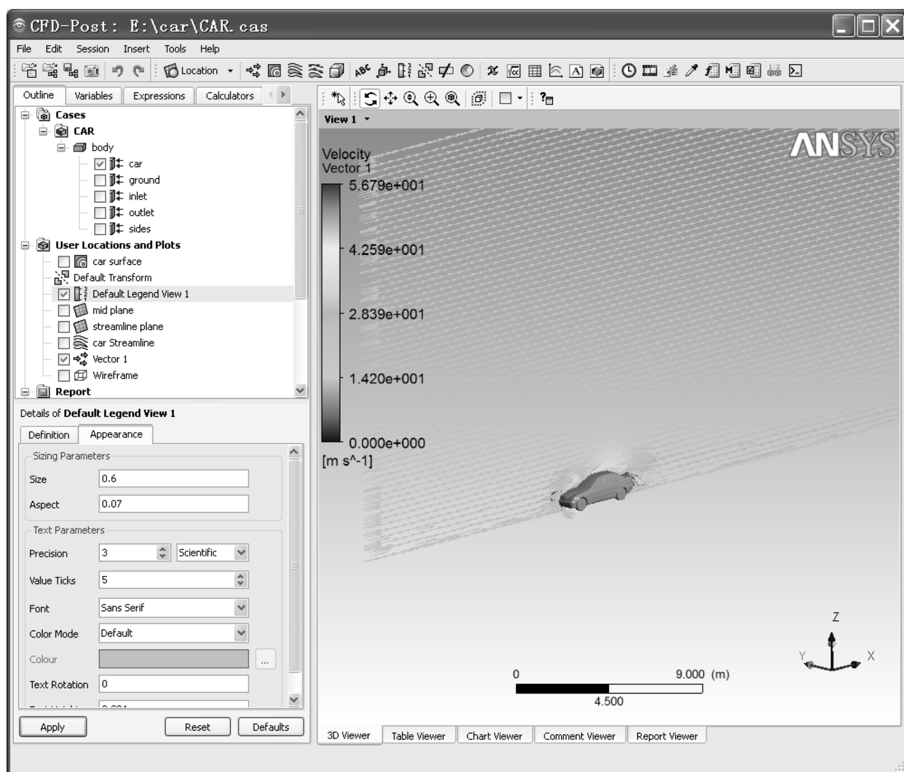


图 4-71 速度矢量图

可以看出，气流在车顶截面处发生变化，在经过车顶最高点后，气流发散，且在尾部形成尾涡。气流产生较大的变化，气流在车头变截面区域附近方向有所变化，同时由于车尾后壁为一竖直壁面，车尾区域存在较大范围的回流区域。

4）标尺修改。右键单击“Default Legend View1”，选择“Edit”项，如图 4-72 所示。在属性栏中修改相关属性，如将标尺显示由 5 改为 10，单击“Apply”按钮，如图 4-73 所示。

5）创建流线。

① 创建截面。选择工具栏“Location”>“Plane”项，创建截面，如图 4-74 所示。输入文件名“streamline plane”，如图 4-75 所示。

② 在“streamline plane”截面属性栏中，选择“Method”项为“YZ Plane”，选择“X”项，设置距离为“-4m”（尽量保持所创建的截面与汽车模型的距离不是太远即可），选择“Type”项为“Circular”或“Rectangular”，本例中选择“Circular”项，“Radius”项尺寸为“7m”，单击“Apply”按钮，视图区中创建好的截面如图 4-76 所示。

③ 显示流线图。单击工具栏上的按钮，输入文件名“car Streamline”，在其属性栏中设置“Type”项为“3D Streamline”，设置“Start From”项为“streamline plane”（或者直接选择 inlet），“#of Points”项的数值设置为“100”，同时取消选择“Outline”Tab 页下的

“streamline plane”项，单击“Apply”按钮，视图区中创建好的流线图，如图 4-77 所示。

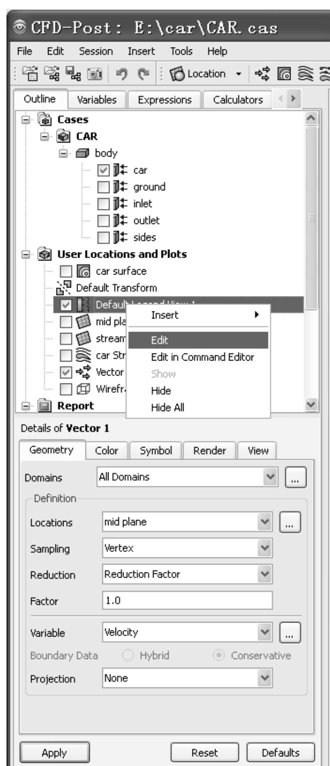


图 4-72　编辑“Default Legend View1”

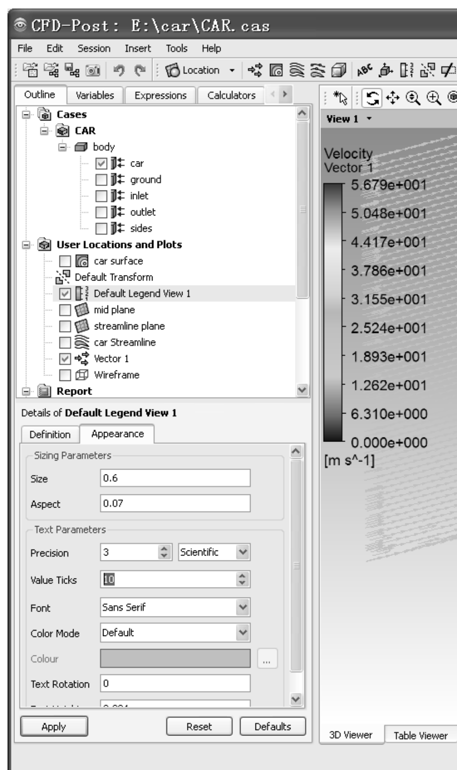


图 4-73　修改属性

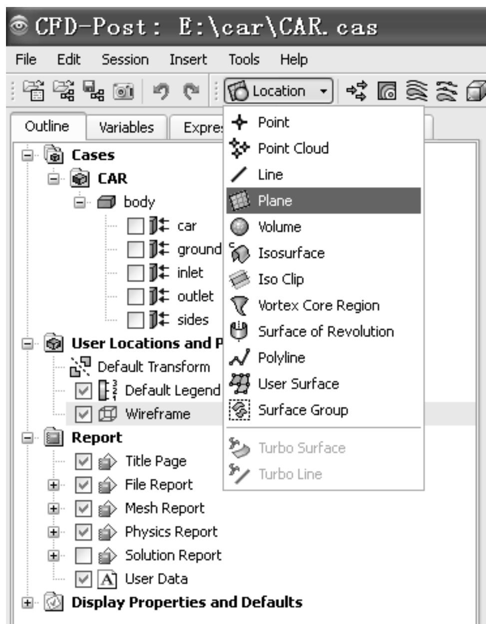


图 4-74　创建截面速度矢量图



图 4-75　输入文件名

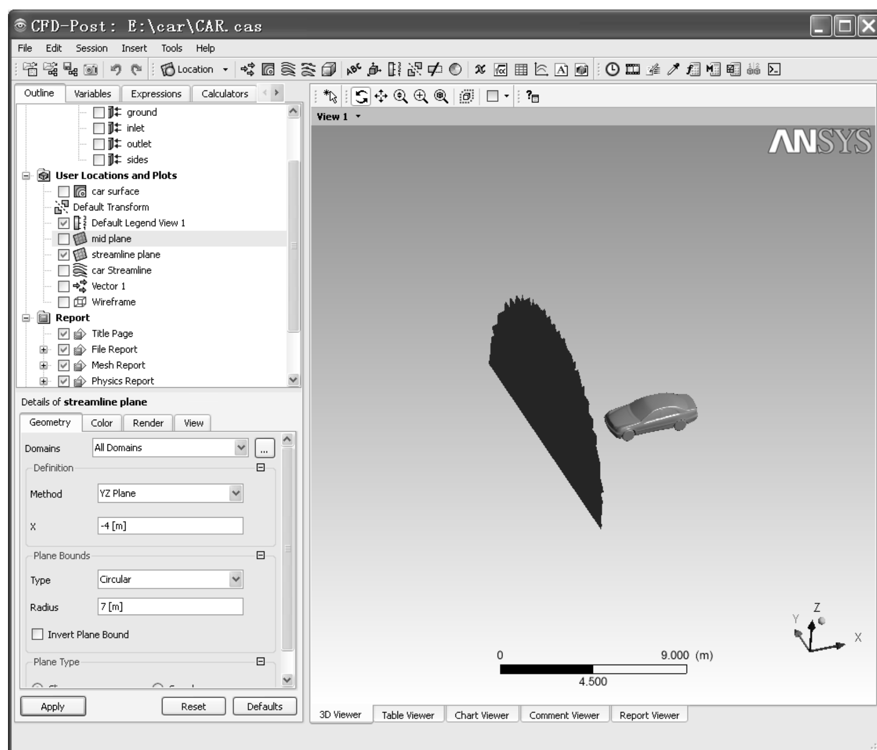


图 4-76　设置截面属性

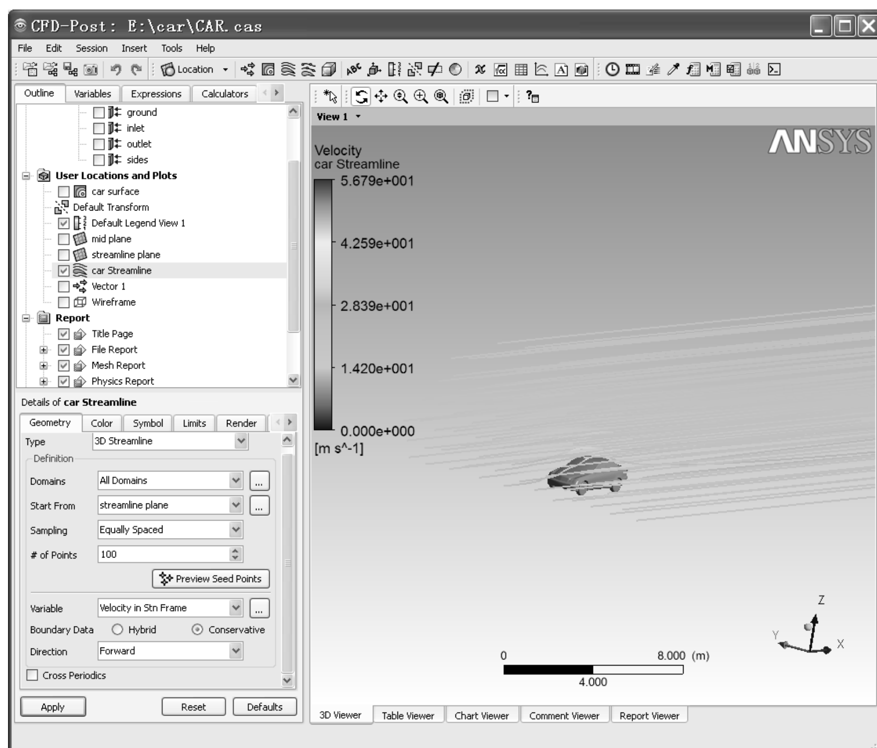


图 4-77　显示流线图



6）创建动画。单击工具栏上的“Animation”（按钮），如图 4-78 所示，可进行动画制作，在其属性栏中单击“运行”（）按钮，然后选择保存路径，如图 4-79 所示，动画制作完成。

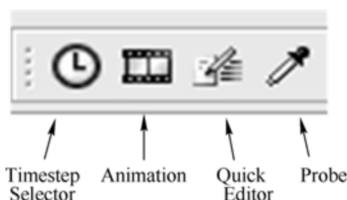


图 4-78　创建动画

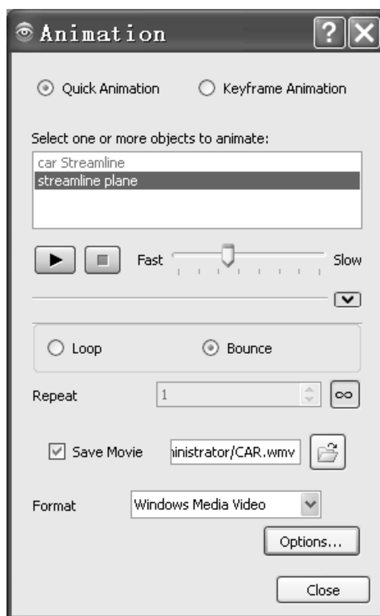


图 4-79　编辑属性

7）保存文件。选择菜单项“File”>“Save state as...”，如图 4-80 所示。在出现的对话框中输入文件名“CAR.cst”，保存后处理文件，如图 4-81 所示。

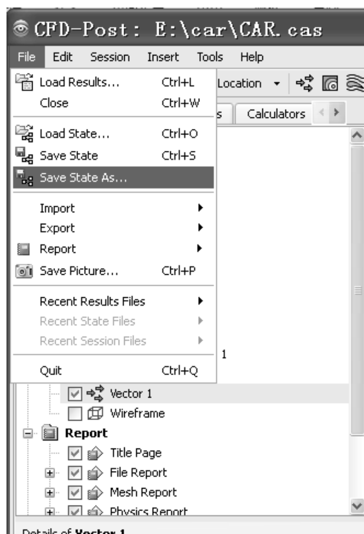


图 4-80　保存后处理文件

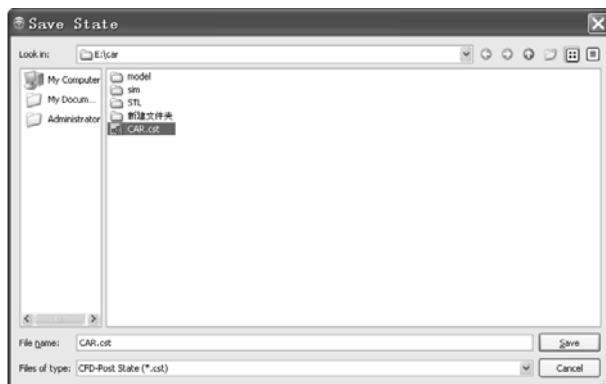


图 4-81　编辑后处理文件名称

注意：本章对应的源文件详见光盘文件夹“car”。



第 5 章　室内通风工程问题分析

本章主要内容：

本章主要通过室内通风问题案例分析，为读者讲解 FLUENT 中辐射模型及太阳辐射模型的应用和求解过程，利用 FLUNET 软件求解工程实践中室内通风问题的分析方法，分析太阳辐射、空气对流传热以及人体散热对室内空气流动和温度分布的影响。

本章学习目标：

✧ FLUENT 中太阳辐射模型的基本知识。

✧ 室内通风问题的求解方法和计算设置过程。

✧ FLUENT 中辐射模型的设置过程。

✧ 室内通风问题的数据处理和显示。

5.1　FLUENT 软件的太阳辐射模型

FLUENT 软件提供的太阳辐射模型能够用于计算太阳射线对计算模型的辐射影响。模型有两个选项：太阳射线跟踪和离散坐标（DO）辐照。太阳辐射模型包括太阳计算器，能够用于构建给定的日期、时间和位置（天空中的太阳方位）。太阳辐射模型只在 3D 求解器中使用，并能用于稳态和非稳态流场。

5.1.1 简介

FLUENT 软件提供了太阳辐射载荷的仿真模型，从而可以方便地应用于空调系统和建筑物中人体舒适度等分析工作中。

在许多的空调建筑物计算中需要考虑太阳辐射的影响，得到乘客周围的温度、湿度和速度场。空调系统可以测试强烈的太阳辐射对车厢降温性能的影响。FLUENT 的太阳辐射模型能够为用户提供模拟太阳负荷的影响，并预测在太阳暴晒下空调系统将轿车的车厢降温到合理温度所需要的时间，并能够预测将温度降低到指定的温度点所需要的时间间隔和计算域中的冷却面积。

在建筑物分析中，太阳辐射构成了温暖天气下对制冷系统的显著热负荷。FLUENT 软件的太阳辐射模型在为工程师提供确定建筑物内部太阳加热效应的有效工具的同时，也考虑了一天中不同时间穿过所有玻璃窗的太阳辐射，从而能够在流场研究前确定设计方案。

5.1.2 太阳射线跟踪算法

太阳射线跟踪算法计算所产生的热流通过能量方程中的源项耦合到 FLUENT 软件的计算中。热源被直接加入到每个表面上的边界计算单元上，并按照壳层导热单元、固体单元和流体单元的顺序分配到相邻的单元中。

太阳射线跟踪选项允许用户在所建立的 FLUENT 模型中包括直接太阳照射及漫射太阳辐射的影响。

直接太阳照射计算使用了两波段光谱模型来考虑可见光和红外波段中不同的材料特性，漫射辐射计算使用了单波段半球平均光谱模型，不透明材料光谱特性使用两波段吸收率进行表征，半透明材料需要指定吸收率和透过率。

太阳射线跟踪算法也考虑了内部散射和漫射的载荷，对直接入射太阳辐射的反射部分进行了追踪，该反射热流的分数称为内部散射能量，其默认值为 1，用户也可自行设置，用于太阳加载计算中的所有表面，用面积进行加权。

太阳射线跟踪算法需要对太阳方位、辐射强度及物质的辐射热物理参数进行设置，包括太阳方向向量、直接太阳辐射、漫射太阳辐射、光谱分数、不透明壁面的直接和红外吸收率、半透明壁面的直接和红外吸收率与透过率、半透明壁面的漫射半球吸收率和透过率、散射分数和地面反射率等参数。用户可以在辐射模型面板上输入太阳方向向量元素（*X*，*Y*，*Z*）和漫射太阳辐射值一起作为输入常数，也可以使用太阳计算器来推导这些参数，辐射也可以使用 UDF（用户自定义函数）进行自定义。太阳辐射模型包括了太阳计算器，能够计算给定日期、时间和位置天空的太阳方位，从而也可以计算出太阳辐射方向向量及辐射强度等参数。

5.1.3 DO 辐射算法

太阳辐射模型的离散坐标（DO）辐射选项为用户提供了直接应用于 DO 模型计算太阳负荷的方法。与射线跟踪太阳加载算法不同的是，DO 辐射算法不计算热流，因而不能直接应用于能量方程中。相反，辐射热流直接作为边界条件应用到半透明壁面上所产生的辐射热流从 DO 辐射传递方程的解计算导出。

在半透明壁面上 DO 辐射算法所需设置的参数为总的辐射（直接和漫射）、光束方向、光束宽度和漫射分数等参数。在使用 DO 辐射算法计算太阳辐射载荷时，用户可以在每个半透明壁面上给出太阳辐射边界条件，通过壁面的 Wall 边界条件面板进行设置，用户可以设置光束方向，总的辐射可通过 Radiation Model 面板上设置的太阳参数（例如太阳计算器）计算导出。使用 DO 算法计算太阳方位和总的辐射量时，通过选择 Use Beam Direction from Solar Parameters 和 Use Total Irradiation from Solar Parameters 选框完成设置。

在 DO 模型中使用的光束方向的符号与输入或从太阳参数导出的太阳方向向量相反。DO 模型中的光束方向是外部辐射的方向（如来自于太阳的辐射），而在太阳辐射模型中太阳方向向量指向太阳。

5.2 实例简介

CFD 工具在暖通空调设计中的应用之一是通过 CFD 分析进行空调系统的气流组织设计。空调房间的气流组织直接影响到空调系统的通风效果，好的气流组织方式能够使空调房间的温度、湿度和空气速度很容易地符合设计要求。反之，差的气流组织方式可能根本就达不到设计要求。因此，在空调系统设计完成之后、施工之前，预测空调系统的气流组织状况很重要。借助 CFD 工具可以预测仿真空调房间的空气流速、温度分布等详细情况，从而指

导设计。

某会议室内部布置如图 5−1 所示。外界空气从空调进风口流入，与屋内空气混合后，废气由排风口排出。本章首先通过三维建模软件 Creo 建立会议室的三维模型，利用 ICEM-CFD 软件进行网格划分、边界条件设定，建立计算模型，然后利用 Fluent 软件求解器对其进行设置并求解，最后利用后处理软件 CFD-Post 软件对计算结果进行分析和后处理。

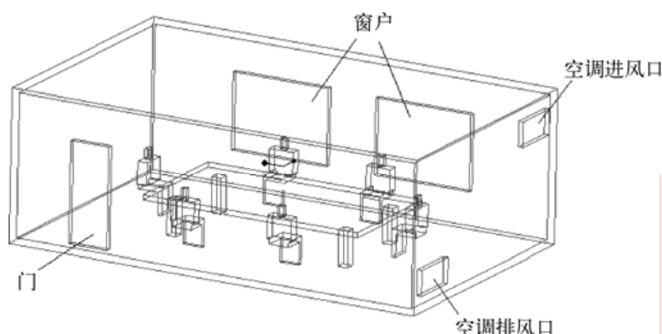


图 5−1 某空调会议室布局图

已知条件包括：

- 空调进口风速为 2m/s，温度为 22℃。
- 会议室内人体温度为 36℃。
- 直接太阳辐射为 1423 W /m^2，漫射太阳辐射为 200W/m^2，光谱分数为 0.5。

本文将通过 Fluent 软件计算，首先加载太阳辐射模型分析太阳辐射对室内空气温度的影响，然后激活表面辐射（S2S）模型来计算模型内部表面之间的辐射热交换，以及人体散热对室内空气流动和温度分布的影响，从而得到会议室内空气流场分布、任意截面空气温度和速度分布等情况。

5.3 模型前处理

5.3.1 导入模型

选择菜单项“File”>“Import Geometry”>“STEP/IGES”，打开“Select STEP/IGES files”对话框，如图 5−2 所示。

1）选择“meeting.IGS”，导入该文件，如图 5−3 所示。

2）属性栏出现导入该文件的有关选项，如图 5−4 所示。

3）保持默认设置，单击“OK”按钮。弹出“Create new project”对话框，单击“Yes”按钮，确认建立该项工作，如图 5−5 所示。

4）视图区出现导入后的 meeting.IGS 文件，如图 5−6 所示。



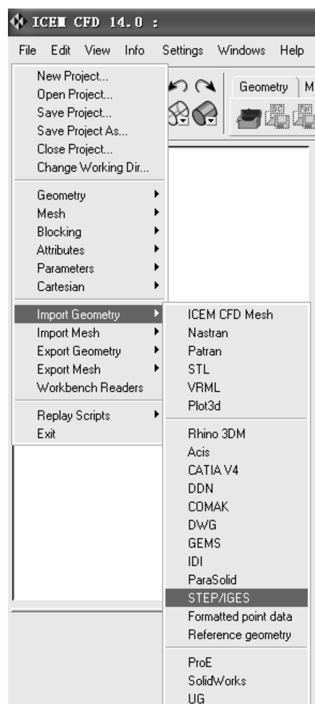




图 5-2　打开“Select STEP/IGES files”对话框　　　　图 5-3　导入文件



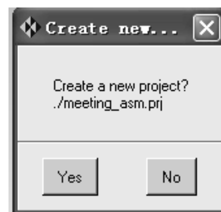


图 5-4　导入方式属性栏　　　　图 5-5　确认建立该项工作

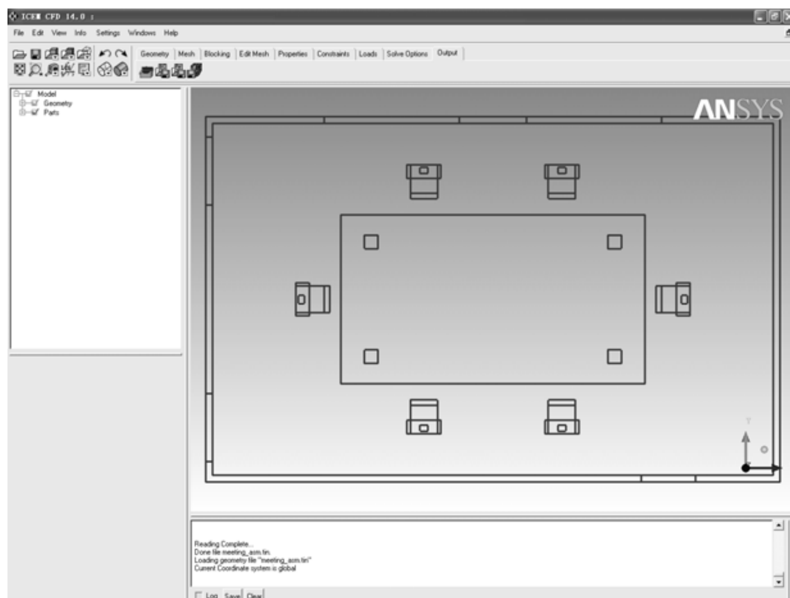


图 5-6　导入后的 meeting.IGS 文件

5.3.2 检查模型及修改

1）旋转并缩小视图，同时展开左侧项目树“Model”>“Parts”，可以看到，模型存在很多个小模型，如图 5-7 所示。

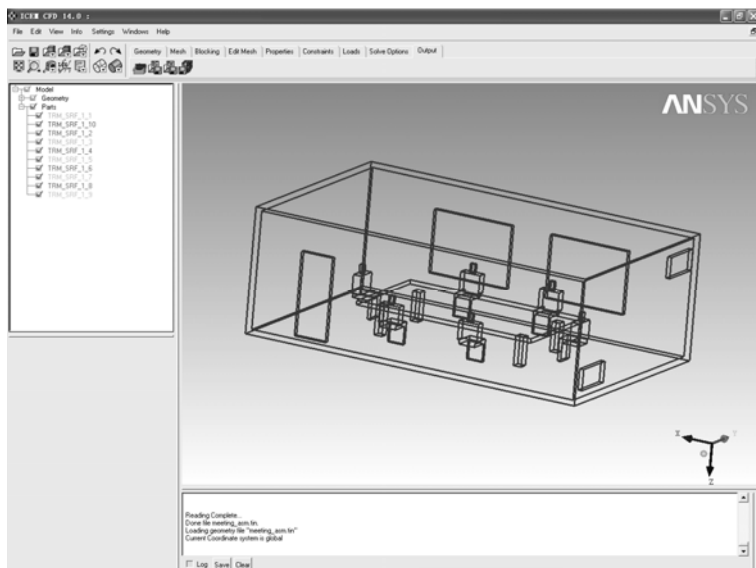


图 5-7　项目树

2）模型修补。

① 删除多余的面。选择工具栏“Geometry”>“Delete Surface”项，展开属性栏，如



图 5-8 所示。选取模型墙体外轮廓面，单击“Apply”按钮，删除所选面。

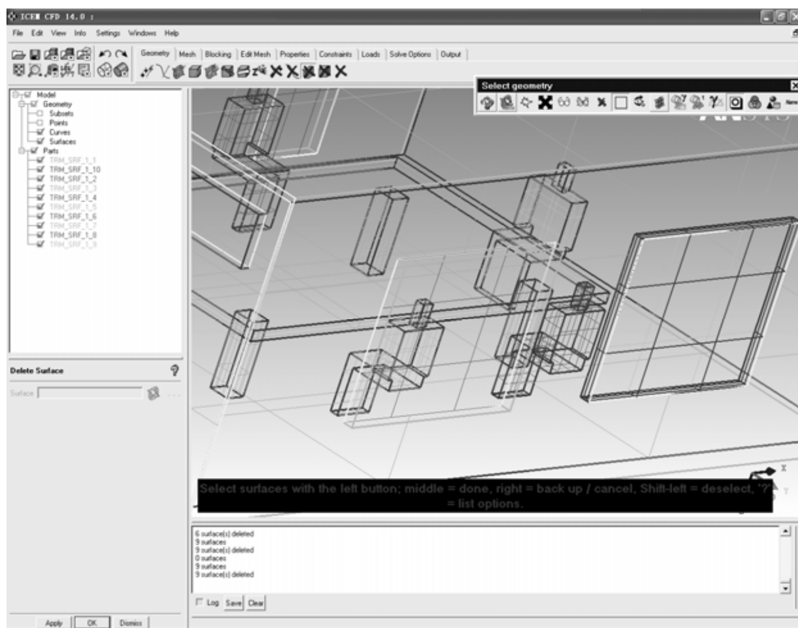


图 5-8　删除面

按照同样的方法删除窗户、门和空调进、排风口处多余的面。

② 删除多余的线。选择工具栏“Geometry”>“Delete Curve”项，展开属性栏，如图 5-9 所示。选取模型墙体外轮廓线，单击“Apply”按钮，删除所选线。

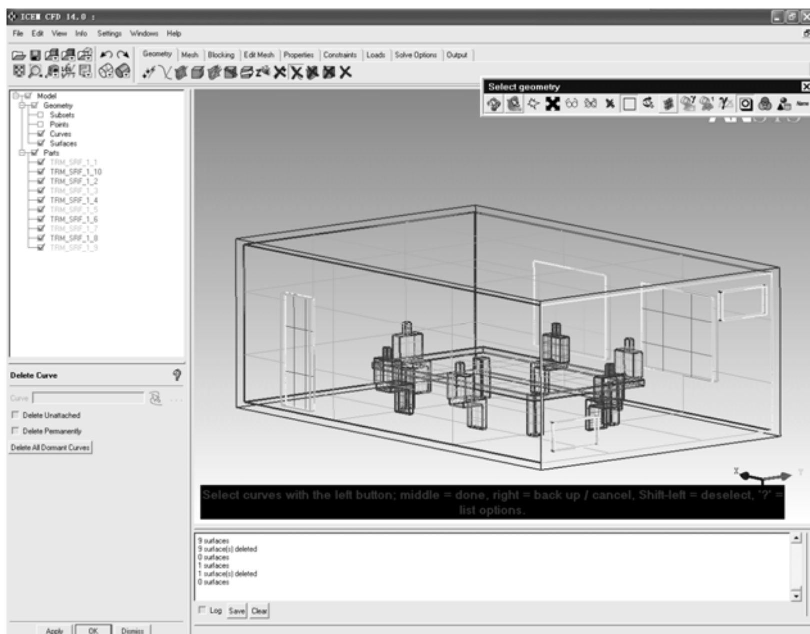


图 5-9　删除线

按照同样的方法删除窗户、门和空调进、排风口处多余的线，最终得到的模型如图 5-10 所示。

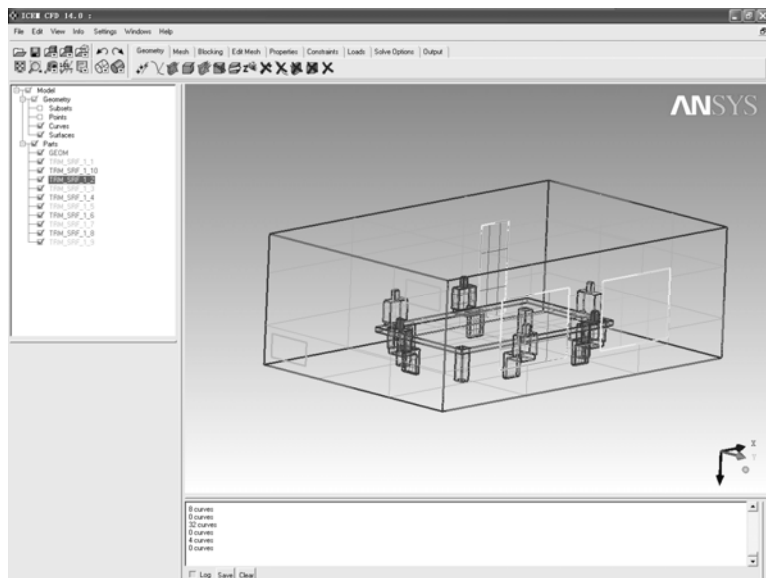


图 5-10　删除多余线的模型

③ 补面。选择工具栏[Geometry]>[Create/Modify Surface]项，展开属性栏。单击属性栏的“Simple Surface”项，同时单击“Curves”项右侧按钮，此时视图区中的鼠标变为十字形式，选择空调进风口对应的面，如图 5-11 所示。选择空调进风口的 4 条线，单击“Apply”按钮，创建空调进风口表面。

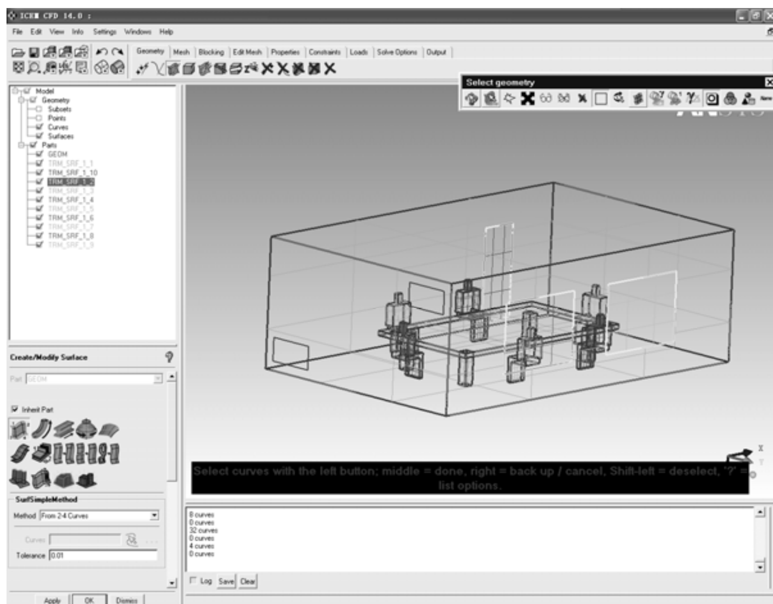


图 5-11　创建空调进风口表面

按照同样的方法创建空调排风口表面，如图 5-12 所示。

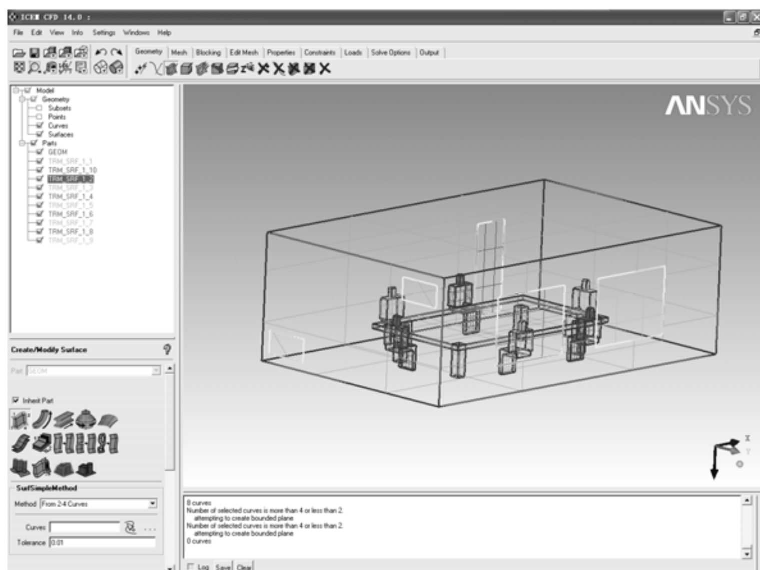


图 5-12　创建空调排风口表面

5.3.3 设置计算域边界

1）右键单击“Model”>“Parts”，选择“Create Part”命令，展开属性栏，输入“Part”名“DESK”。勾选“Model”>“Geometry”>“Surfaces”。同时单击“Create Part”项属性栏中“Entities”项右侧的按钮，此时视图区中的鼠标变为十字形式，框选 DESK 对应的面，如图 5-13 所示。单击鼠标中键或属性栏“OK”按钮，“Model”>“Parts”栏中出现“DESK”项。

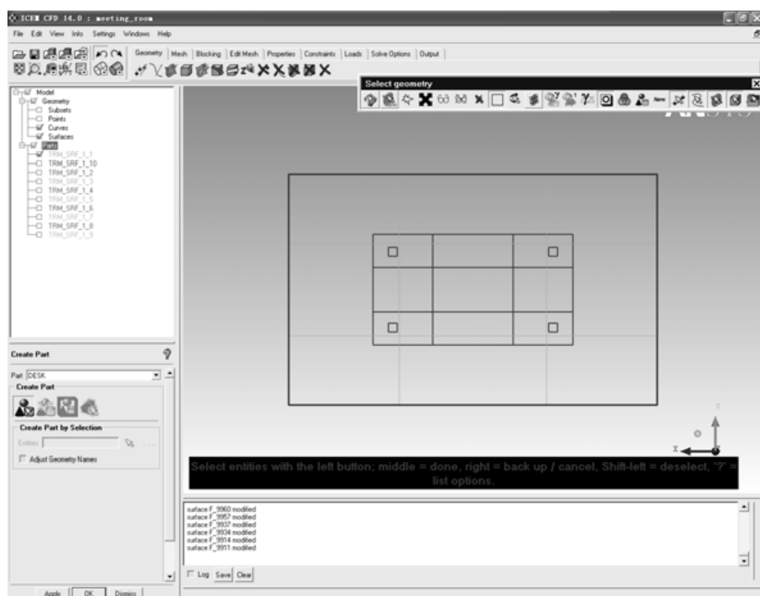


图 5-13　创建 DESK（改图号）

按照同样方法，依次创建 INLET、OUTLET 两个 Part，分别如图 5–14 和图 5–15 所示。

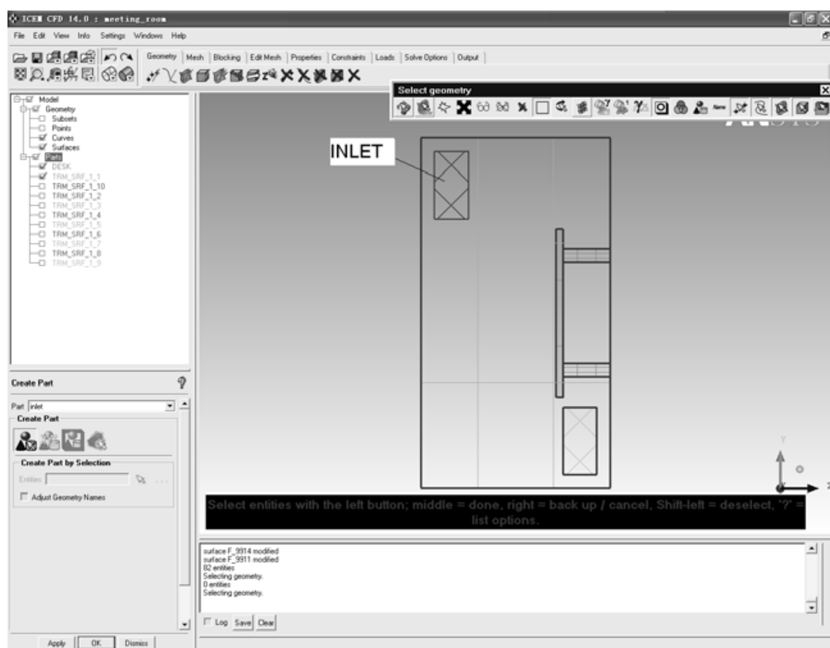


图 5–14　创建 INLET

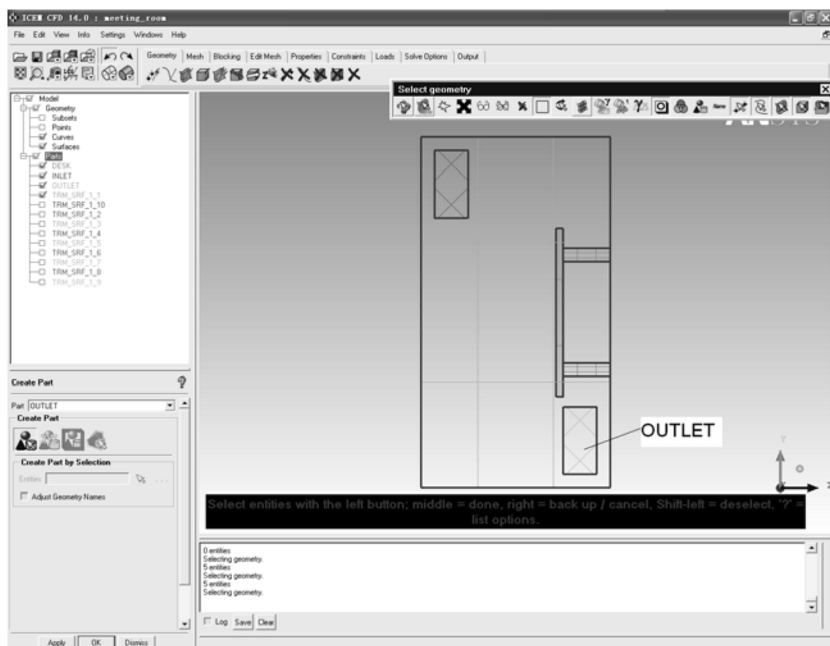


图 5–15　创建 OUTLET

2）重命名 wall 和 door。右键单击“Parts” > “TRM_SRF_1_1”，选择“Rename”命令，如图 5–16 所示。

在弹出的“New name”窗口输入新名字“wall”，单击“Done”按钮，“Model”>“Parts”栏中出现“WALL”项，如图 5-17 所示。

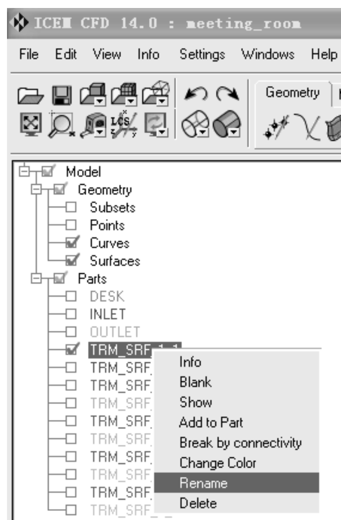


图 5-16　选择“Rename”



图 5-17　重命名“wall”

按照同样方法，更改“TRM_SRF_1_1”为“DOOR”。

3）对 window 和 people 合并、重命名。右键单击“Parts”>“TRM_SRF_1_2”>“TRM_SRF_1_7”，选择“Add to Part”命令。单击“Add to Part by Selection”项属性栏中“Entities”项右侧的按钮，此时视图区中的鼠标变为十字形式，框选需要合并的面，如图 5-18 所示。单击鼠标中键或属性栏“OK”按钮，此 6 项合并为“TRM_SRF_1_3”一项，且其余 5 项对应模型为空白。

右键单击“Parts”>“TRM_SRF_1_2”>“TRM_SRF_1_7”（空白项，除“TRM_SRF_1_3”），选择“Delete”命令。单击“Delete”按钮，删除空白模型号，如图 5-19 所示。

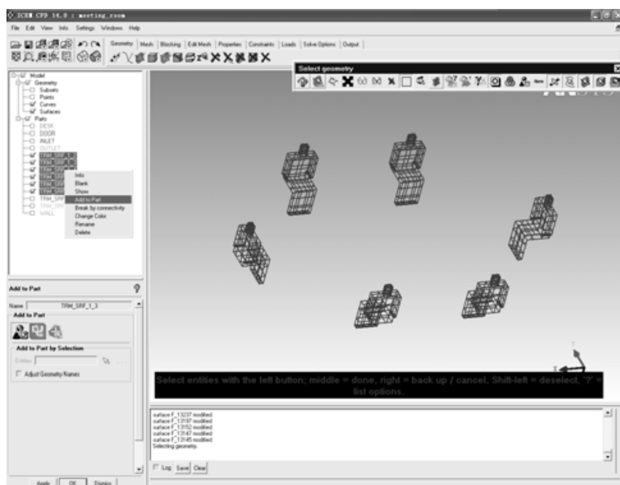


图 5-18　合并人体模型

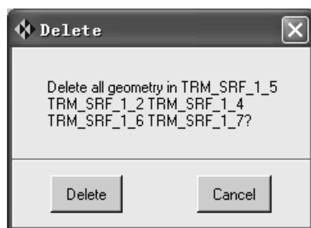


图 5-19　删除空白模型号

按照同样方法，合并窗户模型，并对人体和窗户模型进行重命名。至此，完成计算域边界的设置，如图 5-20 所示。

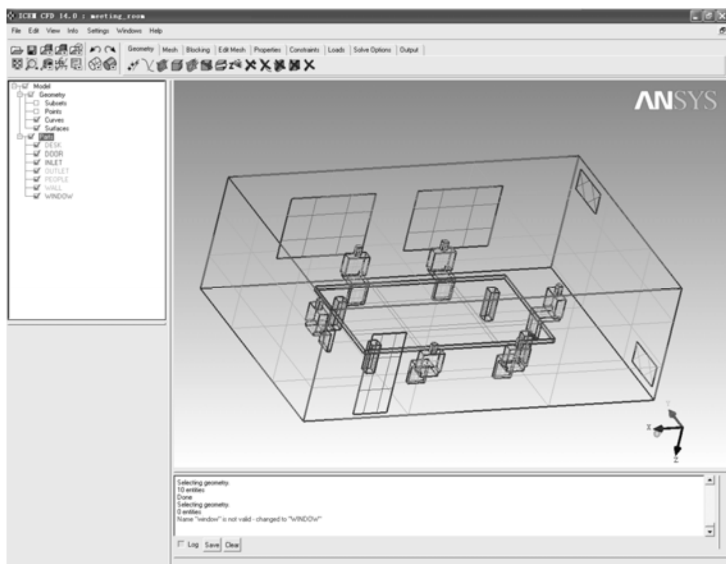


图 5-20　计算域边界设置完成

5.3.4 创建流体域的 Body 项

1）选择工具栏“Geometry”>“Create Body”项，展开属性栏，如图 5-21 所示。

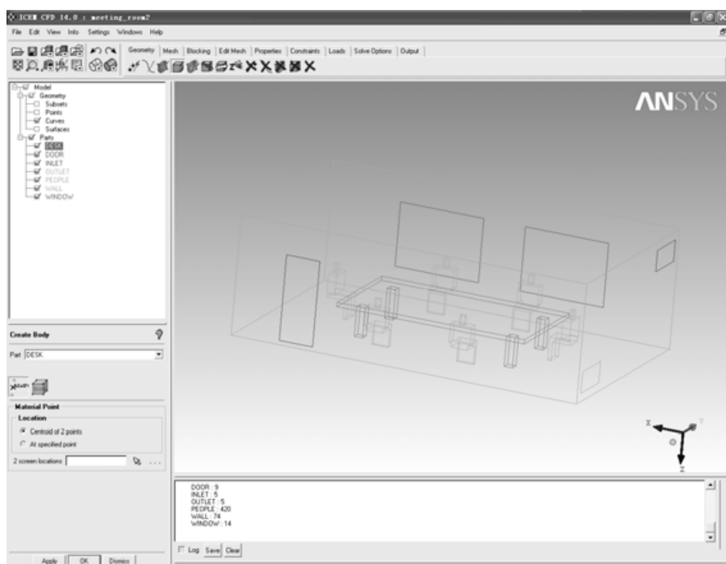


图 5-21　Create Body 项属性栏

2）输入“Part”名“FLUID”，同时单击属性栏中“2 screen locations”右侧的按钮，此时视图区中的鼠标变为十字形式，选择图 5-22 所示的两个顶点。

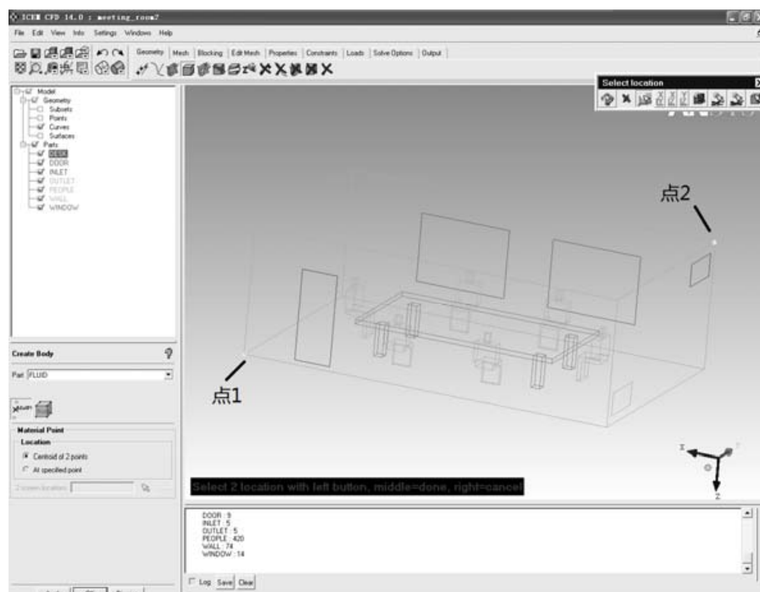


图 5-22　选择两个顶点

3）单击鼠标中键或属性栏“OK”按钮，在“Model”>“Parts”栏和视图区中生成“FLUID”项，如图 5-23 所示。

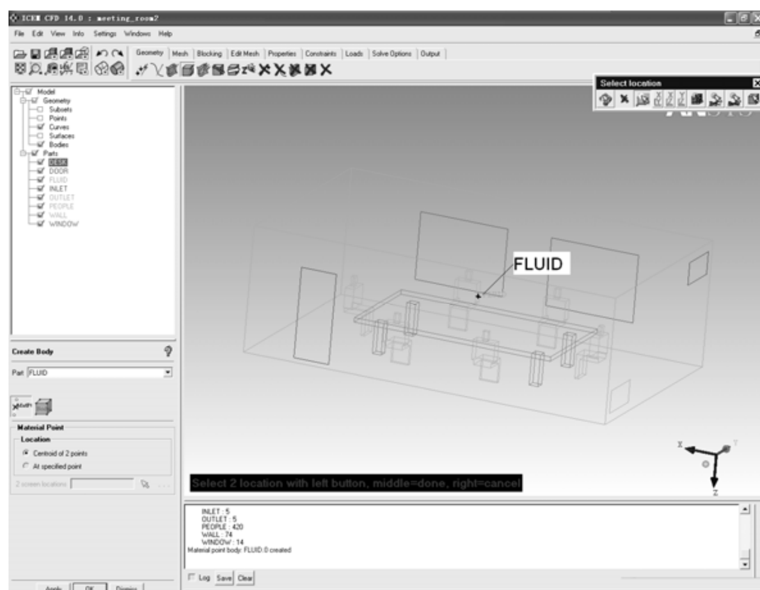


图 5-23　生成“FLUID”项

5.3.5 网格划分

1）选择工具栏“Mesh”>“Global Mesh Setup”项，展开属性栏，进行网格尺寸设置，如图 5-24 所示。在“Global Element Seed Size”项输入“Max element”为“100”，即最

大网格尺寸为 0.1m。单击“Apply”按钮确认操作。

2）选择工具栏“Mesh”>“Compute Mesh”项，展开属性栏，如图 5-25 所示。在属性栏中默认选择“Volume Mesh”项，选择“Mesh Type”项为“Tetra/Mixed”。单击“OK”按钮，开始划分网格。

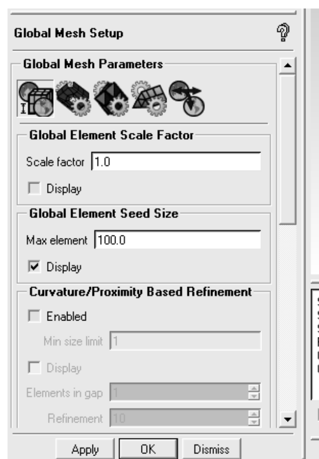


图 5-24 设置网格尺寸

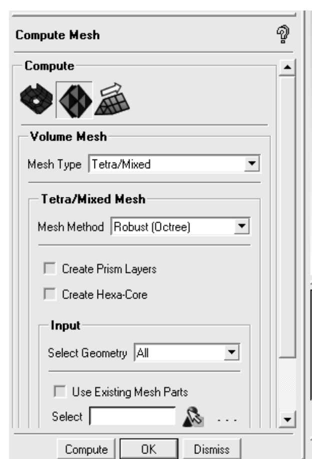


图 5-25 Compute Mesh 项属性栏

3）软件界面右下侧的命令行和进度条显示出网格划分进度，如图 5-26 所示。

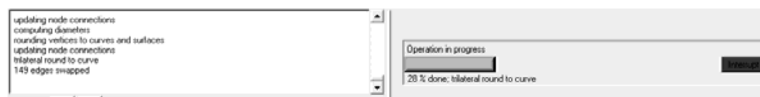


图 5-26 网格划分进度

4）网格划分完毕，结果显示网格总数为 1728927，如图 5-27 所示。

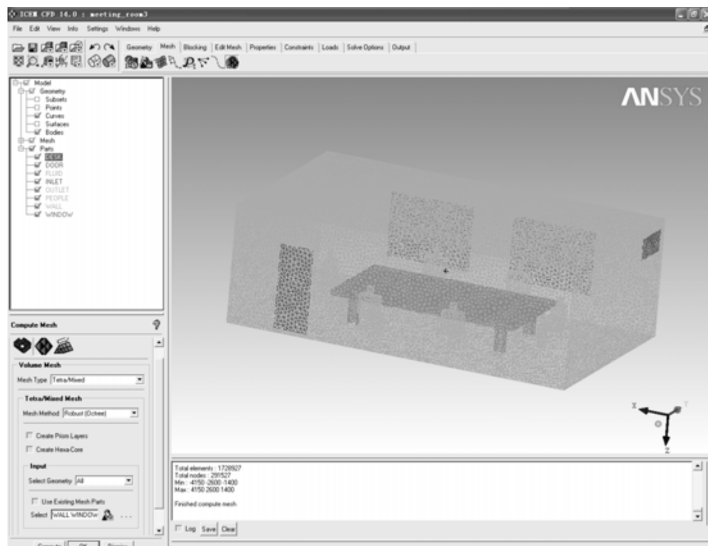


图 5-27 网格总数

5.3.6 网格质量检查

1）选择工具栏“Mesh”>“Edit Mesh”>“Check Mesh”（按钮），进行网格质量检查，如图 5-28 所示。通过软件可以选择检查任何可能存在的错误和问题。

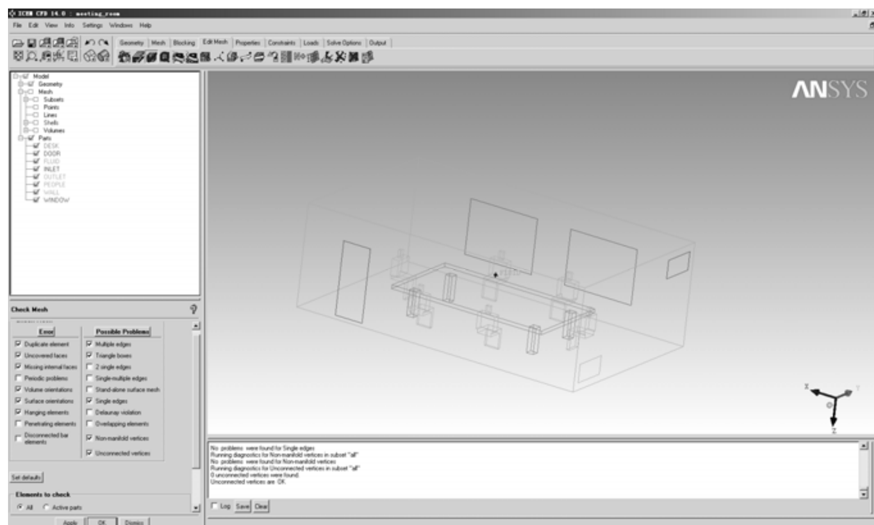


图 5-28　检查网格质量

2）显示网格质量。选择工具栏“Edit Mesh”>“Display Mesh Quality”（按钮）。在属性栏“Quality type”中选择“Quality”项，然后单击“Apply”按钮，在软件右下角可以看到体网格质量分布，属性栏中显示相应的网格数量。

单击网格质量柱状图中的任意柱形，即可在视图中显示该质量下的网格，如图 5-29 所示。

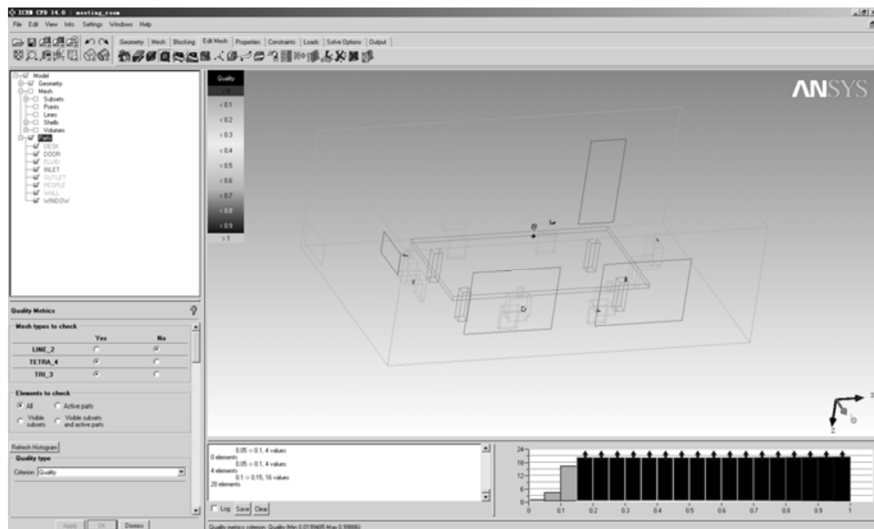


图 5-29　不同网格质量显示

3）进行网格光顺，提高网格质量。如图 5-30 所示，选择工具栏“Edit Mesh”>“Smooth Mesh Globally”（按钮）。在属性栏中单击“Apply”按钮，在软件右下角可以看到光顺后的体网格质量分布情况。

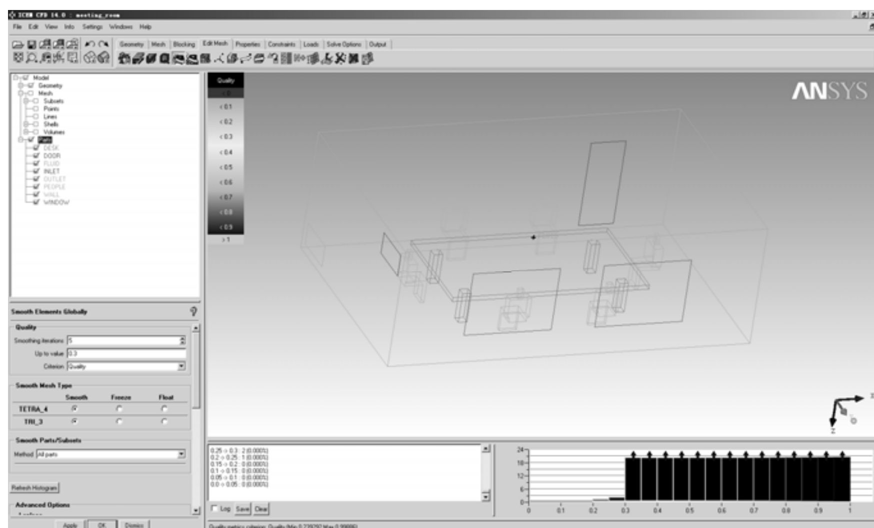


图 5-30 网格光顺

4）右键单击“Model”>“Mesh”，选择“Cut Plane”>“Manage Cut Plane”项。勾选并右键单击“Model”>“Mesh”>“Volumes”项，选择“Solid & Wire”项，如图 5-31 和图 5-32 所示。



图 5-31 显示网格

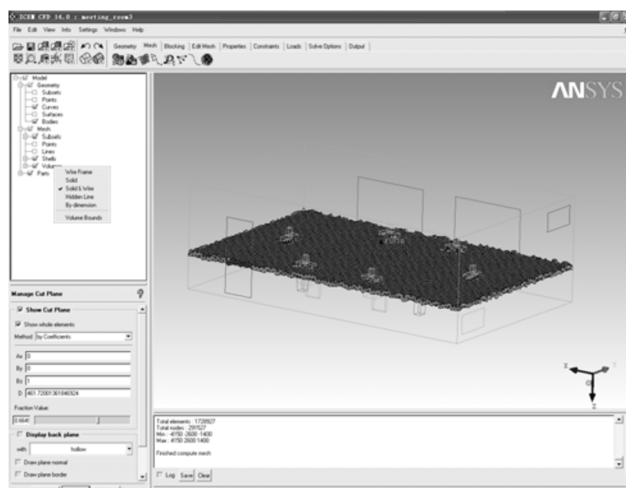


图 5-32 网格示意图

5）通过改变属性栏“Fraction Value”的数值，或滚动鼠标中键，显示模型不同位置的网格，如图 5-33 所示。

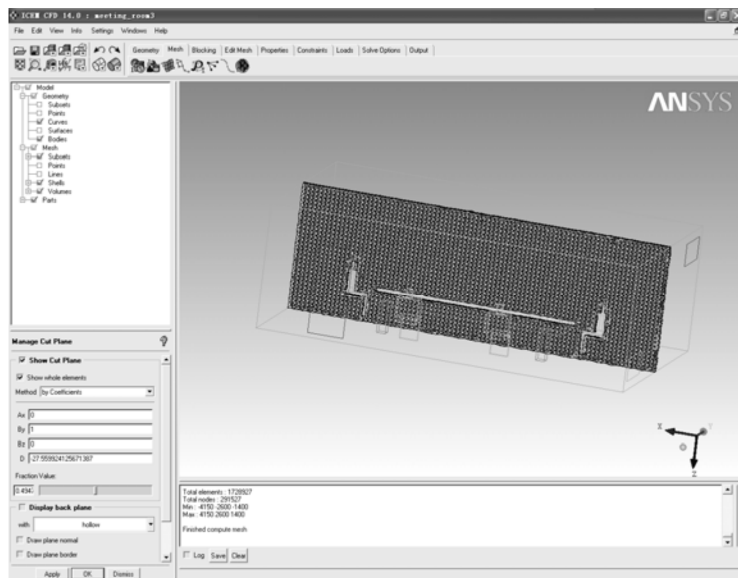


图 5-33　显示网格某截面

5.3.7 输出网格

1）选择工具栏“Output”>“Select Solver”项，属性栏展开如图 5-34 所示。选择网格输出方式，将“Output Solver”项选择为“Fluent_V6”，将“Common Structural Solver”项选择为“ANSYS”，单击“Apply”按钮确认操作。

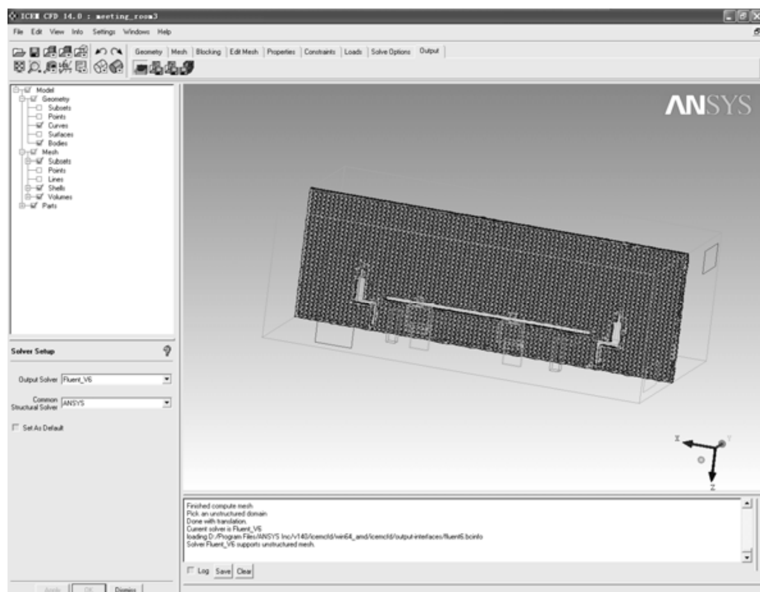


图 5-34　选择网格输出方式

2）选择工具栏“Output” > “Write Input”项，弹出“Save”对话框，如图 5-35 所示。单击“Yes”按钮，稍后出现“打开”对话框，选择文件保存位置，如图 5-36 所示。

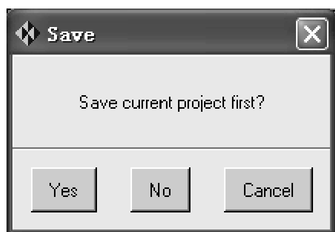


图 5-35 “Save”对话框

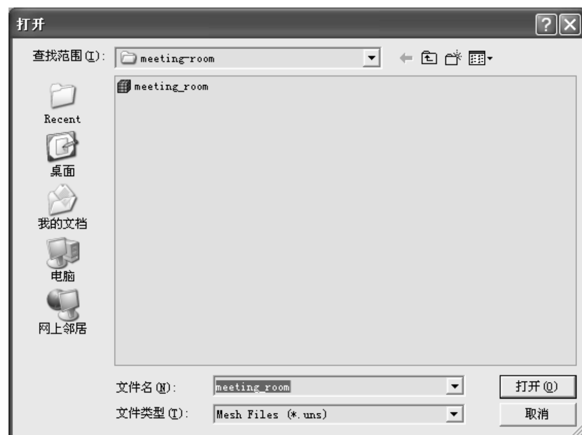


图 5-36 选择文件保存位置

3）单击“打开”按钮，接着出现“FLUENT V6”对话框，如图 5-37 所示。在“Output file”文本框输入文件保存的地址及文件名。单击“Done”按钮，执行保存操作。查看“meeting-room.msh”文件，大小为 60672kB。

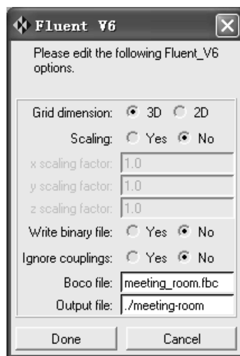


图 5-37 输入文件保存的地址及文件名

4）单击“保存”按钮，保存该项工作的所有内容。

5.4 计算求解

5.4.1 导入模型网格

1）读取网格

采用默认设置，打开 FLUENT 软件界面。准备导入网格文件，如图 5-38 所示，选择菜单项“File” > “Read” > “Mesh...”，弹出图 5-39 所示的“Select File”对话框。选择文件“meeting-room.msh”，单击“OK”按钮，导入网格文件。



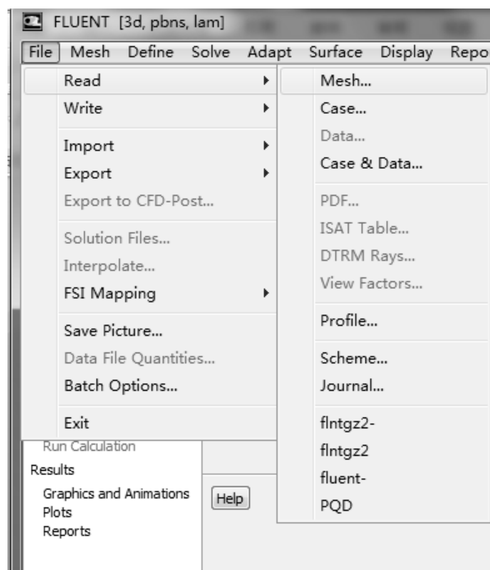


图 5-38　导入网格文件

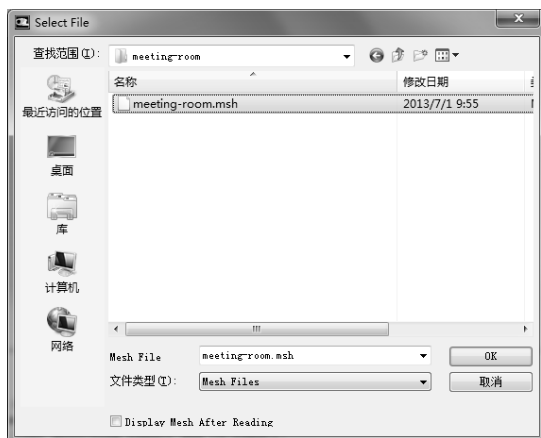


图 5-39　选择文件

2）显示网格

如图 5-40 所示，选择菜单项“Display” > “Mesh...”，打开“Mesh Display”对话框。

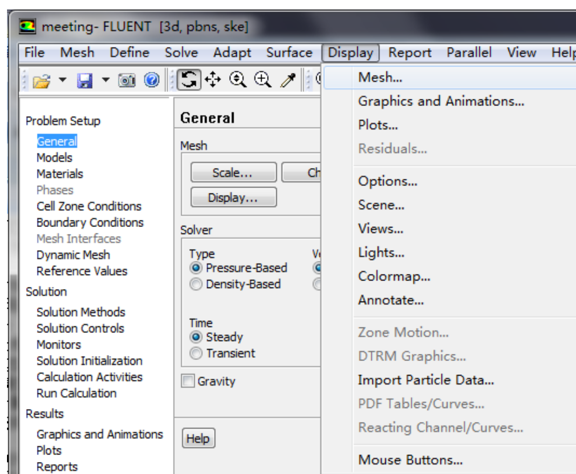


图 5-40　打开“Mesh Display”对话框

如图 5-41 所示，单击“Mesh Display”对话框中的“Display”按钮，视图区显示出计算模型的网格。可以看到，软件将进口处显示为蓝色，将出口处显示为红色。单击“Close”按钮退出。

3）确定长度单位

选择左侧项目树“Problem Setup” > “General”项属性栏中的“Scale...”选项，弹出“Scale Mesh”对话框。由于此模型三维建模时采用的单位为 mm，而 FLUENT 软件采用的默认单位是 m。因此，需要对网格进行缩放。将对话框右侧的“Mesh Was Created In”项设

置为“mm”，“Scaling Factors”下的各项值则相应地由 1 改变为 0.001。单击“Scale”按钮，计算域的坐标范围变换为图 5-42 所示的形式。单击“Close”按钮退出。

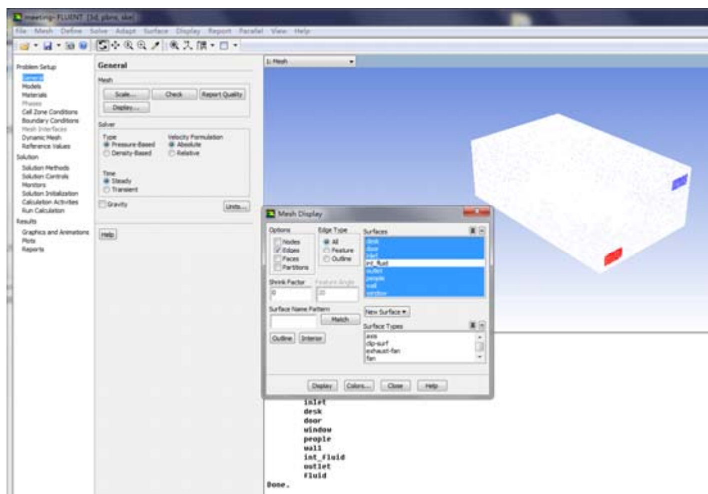


图 5-41 计算模型的网格

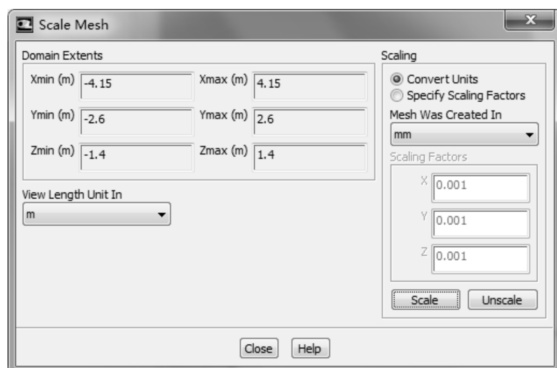


图 5-42 改变计算域的坐标范围

4）检查网格质量

选择左侧项目树“Problem Setup”>“General”项属性栏中的“Check”选项，检查导入网格的质量，具体信息在右下角的信息栏显示，如图 5-43 所示。

5）单位转换

选择左侧项目树“Problem Setup”>“General”项属性栏中“Units...”选项，将默认的温度单位 K 改为℃，如图 5-44 和图 5-45 所示。

6）激活重力的作用

勾选左侧项目树“Problem Setup”>“General”项属性栏中的“Gravity”，根据模型的坐标设置重力加速度，如图 5-46 所示。

7）网格光滑处理

选择“Mesh”>“Smooth/Swap…”选项，弹出“Smooth/Swap…”对话框，如图 5-47 所示。



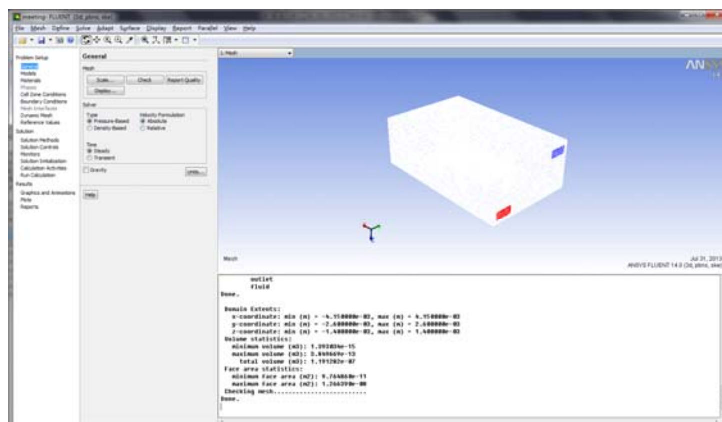


图 5-43　检查网格质量

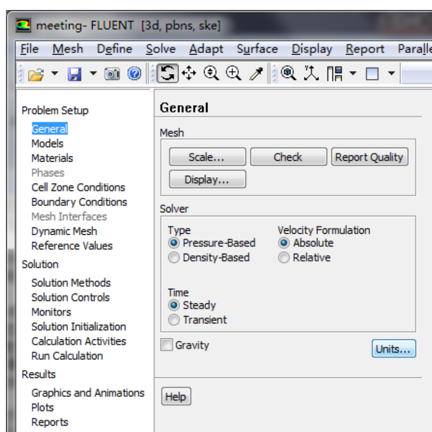


图 5-44　单位转换

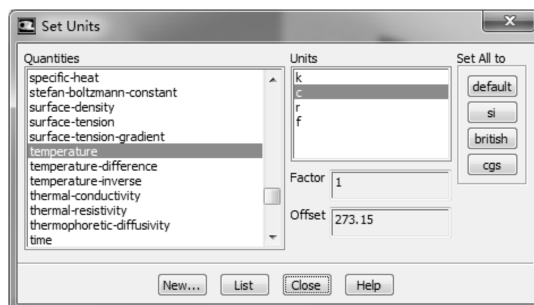


图 5-45　选择温度单位

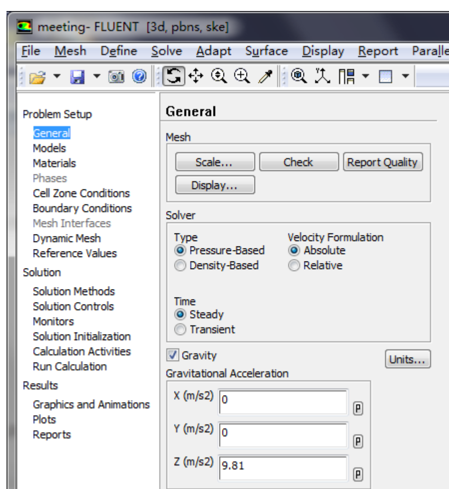


图 5-46　激活重力的作用

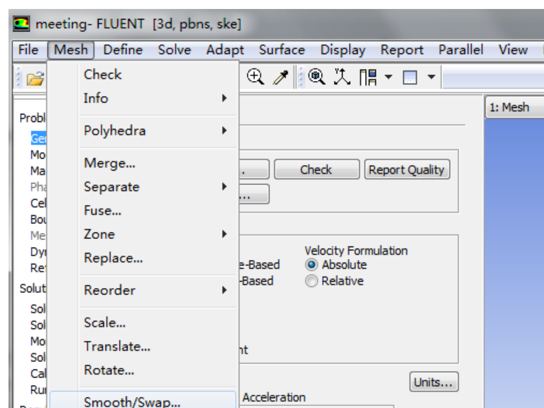


图 5-47　网格光滑处理

选择“Method”下拉菜单中的“quality based”，单击“Smooth”和“Swap”按钮，结果显示需光顺的网格数为“3”，如图 5-48 所示。选择“Method”下拉菜单中的“skewness”，单击“Smooth”和“Swap”按钮，结果显示需光顺的网格数为“43”，如图 5-49 所示。

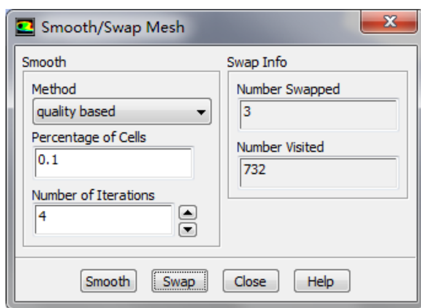


图 5-48 质量不好网格的光滑处理

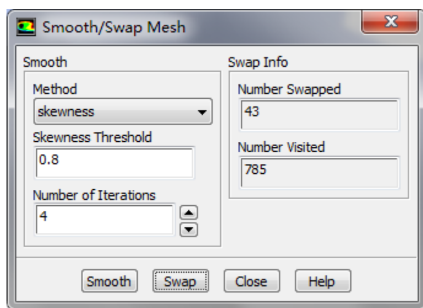


图 5-49 角度不好网格的光滑处理

5.4.2 物理条件设置

1）默认选择“Problem Setup”>“General”项属性栏中的各项设置。

2）开启能量方程。选择“Problem Setup”>“Models”项，双击其属性栏中的“Energy-Off”项，勾选“Energy Equation”，开启能量方程，如图 5-50 所示。

3）激活 k-epsilon 湍流模型。选择“Problem Setup”>“Models”项，双击其属性栏中的“Viscous-Laminar”项，更改流体计算模型。在打开的“Viscous Model”对话框中，默认为“Laminar”层流选项，选择“k-epsilon(2 eqn)”项，对话框展开为图 5-51 所示的形式。单击“OK”按钮，确认选择。

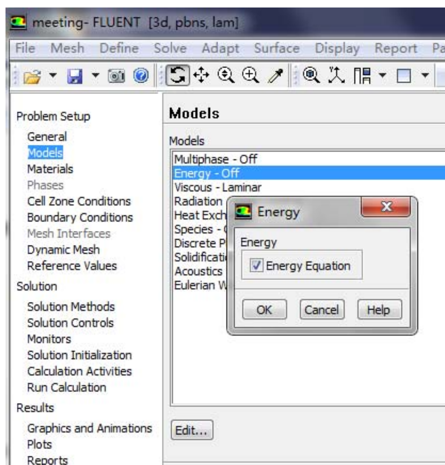


图 5-50 开启能量方程

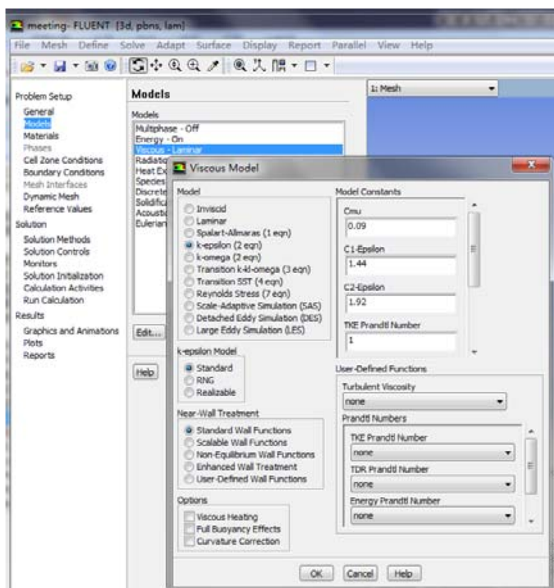


图 5-51 更改流体计算模型

4）激活太阳辐射模型。双击“Problem Setup”>“Models”项属性栏中的“Radiation-Off”项，弹出“Radiation Model”对话框。选择“Solar Load”栏下的“Solar Ray Tracing”项，激活太阳射线跟踪算法，对话框展开为图 5-52 所示的形式。

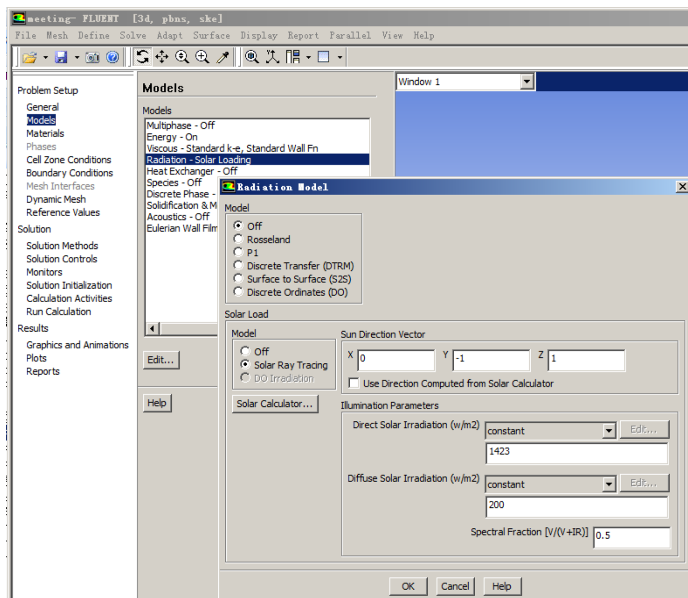


图 5-52　激活太阳辐射模型

① 设置太阳方位。

- 方法一：输入“Sun Direction Vector”的 *X*、*Y*、*Z* 元素的值。
- 方法二：通过激活“Use Direction Computed from Solar Calculator”选项来选择从太阳计算器计算该向量。

② 设置照射参数。在“Illumination Parameters”下的“Direct Solar Irradiation”文本框中输入直接太阳辐照值，该参数是直接太阳辐照在单位面积上产生的能量，单位为 W/m^2。该参数的取值取决于一年中的时间和天空的晴朗程度。在其近邻下拉列表框中，用户可以输入 constant（常数），或使用太阳计算器来计算直接太阳辐照，或使用用户定义函数指定直接太阳辐照。在此取值 1423 W/m^2。

③ 输入 Diffuse Solar Irradiation（漫射太阳辐照）的值。该参数是漫射太阳辐照在单位面积上产生的能量，单位为 W/m^2。该参数的取值可以取决于一年中的时间和天空的晴朗程度，也可取决于地面反射率。在其近邻下拉列表中，用户可以输入 constant（常数），或使用太阳计算器来计算直接太阳辐照，或使用用户定义函数指定直接太阳辐照。在此取值 200W/m^2。

④ 用户选择“Solar Ray Tracing”太阳射线跟踪算法，则需要输入“Spectral Fraction”（光谱分数）值。光谱分数是可见光部分的入射太阳辐射占太阳辐射光谱的分数。在此采用 0.5 的值将长波（IR）和短波（V）辐射个分为 50%。

5）定义物质热物理特性参数。

① 空气的特性参数。双击“Problem Setup”>“Materials”项属性栏中的“air”项，弹

出“Create/Edit Materials”对话框，保留默认设置，如图 5-53 所示。

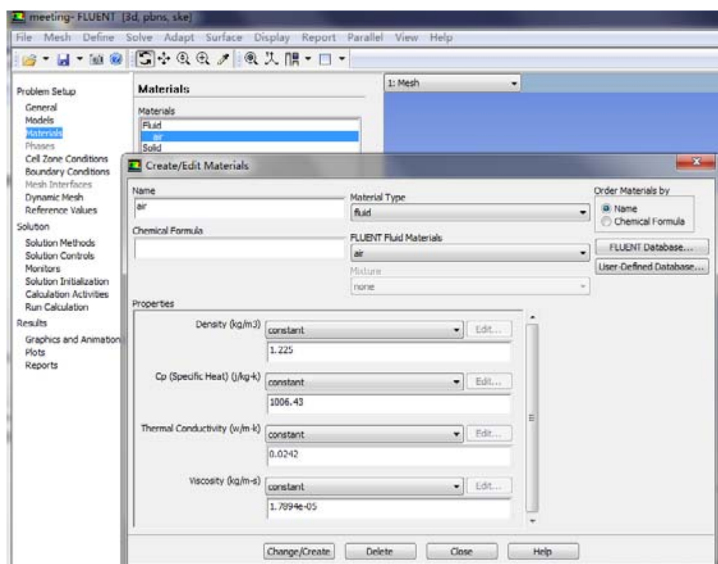


图 5-53 设置空气的特性参数

② 创建名为“building-insulation”的物质。同样单击“aluminum”项，在 Materials 面板中的“Name”下输入“building-insulation”作为要创建物质的名称，将其重命名为“building-insulation”，如图 5-54 所示。设置表 5-1 所示参数。

表 5-1 参数表

Parameter	Value
Density(kg/m^3)	10
Cp(j/kg-K)	830
Thermal Conductivity(W/m・K)	0.1

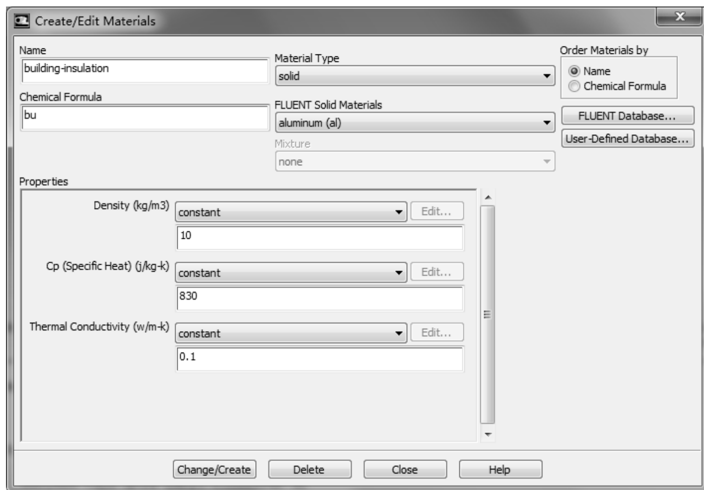


图 5-54 设置 building-insulation 的特性参数

单击“Change/Create”按钮，并在随后的对话框中询问是否覆盖已存在的物质时，单击“No”按钮。

③ 创建名为 glass 的物质。按上述方法，创建特性表 5-2 所示的名为 glass 的物质。

表 5-2 参数表

Parameter	Value
Density(kg/m^3)	2220
Cp(j/kg• K)	830
Thermal Conductivity(W/m• k)	1.15

5.4.3 边界条件设置

（1）进口边界条件设置

1）保持“Problem Setup”>“Materials”和“Problem Setup”>“Cell Zone Conditions”两项属性栏设置不变。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“inlet”边界，软件默认其为“velocity-inlet”条件，如图 5-55 所示。

单击“Edit...”按钮，在弹出的“Velocity Inlet”对话框中，输入速度值为“2”，如图 5-56 所示，单击“OK”按钮退出。

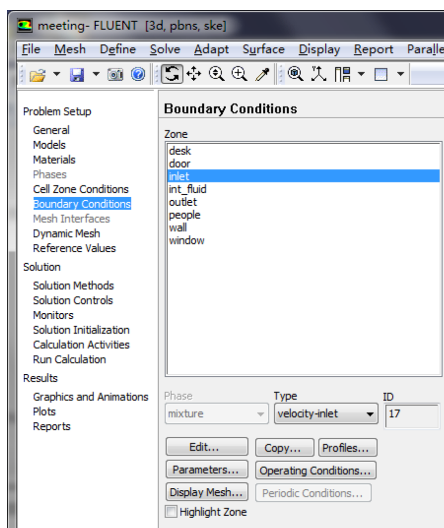


图 5-55 进口边界条件设置

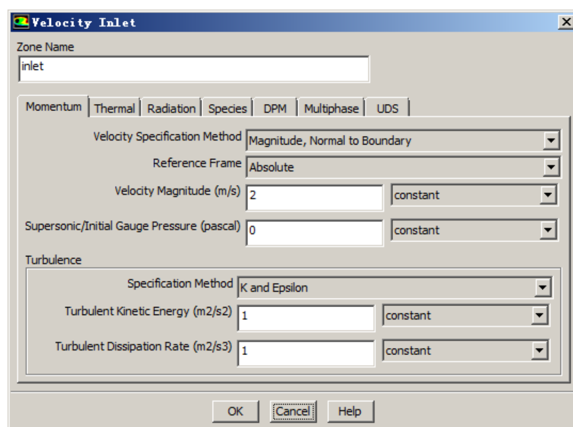


图 5-56 输入进口速度

2）定义入口温度为 22℃，如图 5-57 所示。

3）用户也可通过激活“Participates in Solar Tracing”（参与太阳射线追踪）选项设置边界是否参与太阳射线追踪计算，如图 5-58 所示。如果用户通过关闭该选项来屏蔽太阳射线追踪计算，将忽略相应表面，太阳射线穿过表面时与表面不发生相互作用，而不考虑边界条件的类型。

（2）出口边界条件设置

1）选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“outlet”边界，将“velocity-inlet”条件更改为“Outflow”条件，如图 5-59 所示。在图 5-60 所示的对话框中单击“Yes”按钮。

2）在图 5-61 所示的“Outflow”对话框中单击“OK”按钮，保持默认设置。

（3）人体边界条件设置

选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“people”边界。默认其为 wall 边界，单击“Edit...”按钮，在弹出的“Wall”对话框中，选择 Tab 页“Thermal”，然后

选择“Thermal Conditions”栏下的“Temperature”项，在右侧“Temperature”项中输入“36”作为人体温度值，如图 5-62 所示。单击“OK”按钮退出。

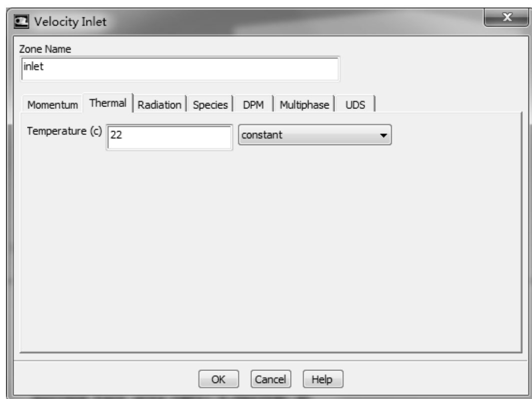


图 5-57 输入进口温度

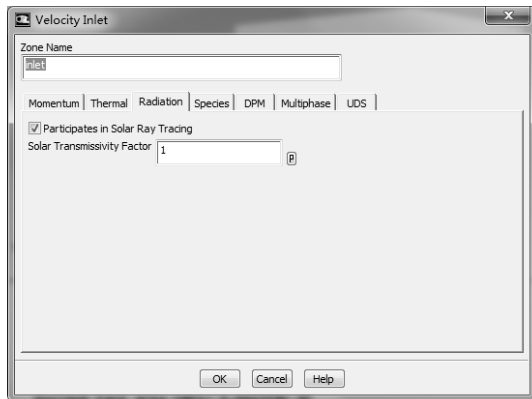


图 5-58 设定是否参与太阳射线追踪计算

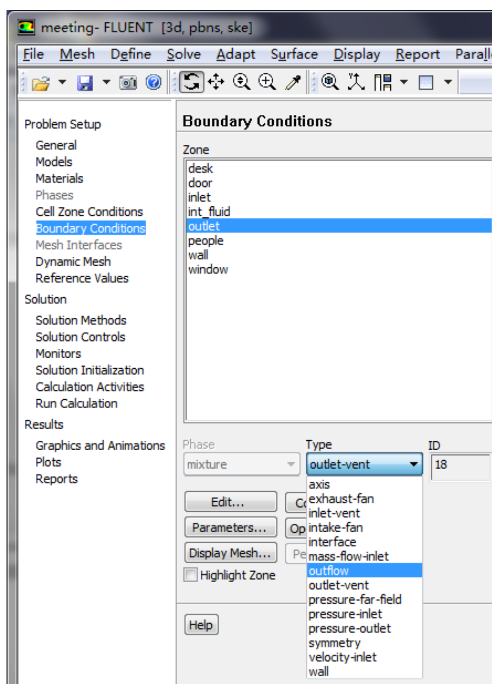


图 5-59 修改边界条件

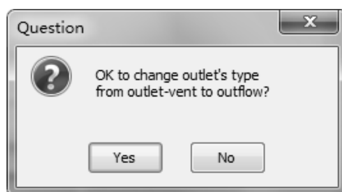


图 5-60 确认修改边界条件

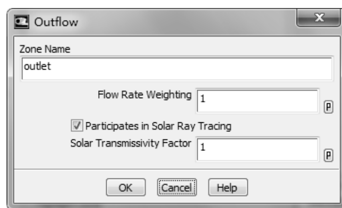


图 5-61 确认 Outflow 边界条件

（4）壁面边界条件设置

打开 Wall 边界条件面板，选择 Tab 页的“Thermal”，选择“Material Name”下拉列表框的“building-insulation”，如图 5-63 所示。

选择 Tab 页的“Radiation”，不透明壁面不允许任何太阳辐射穿过，对于不透明壁面，选择“BC Type”下拉列表框的“opaque”项，激活“Participates in Solar Ray Tracing”选项，并输入“Direct Visible”（直接可见光）和“Direct IR”（直接红外）吸收率常数，如

图 5-64 所示。

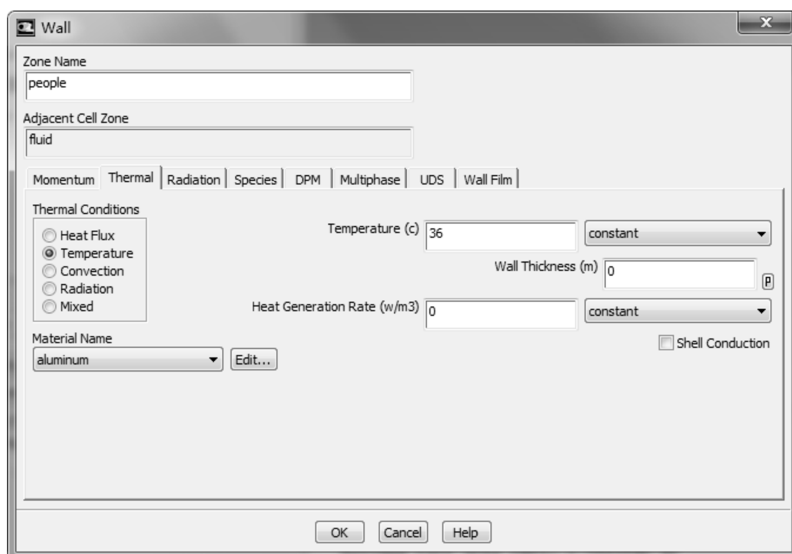


图 5-62　输入人体热流量

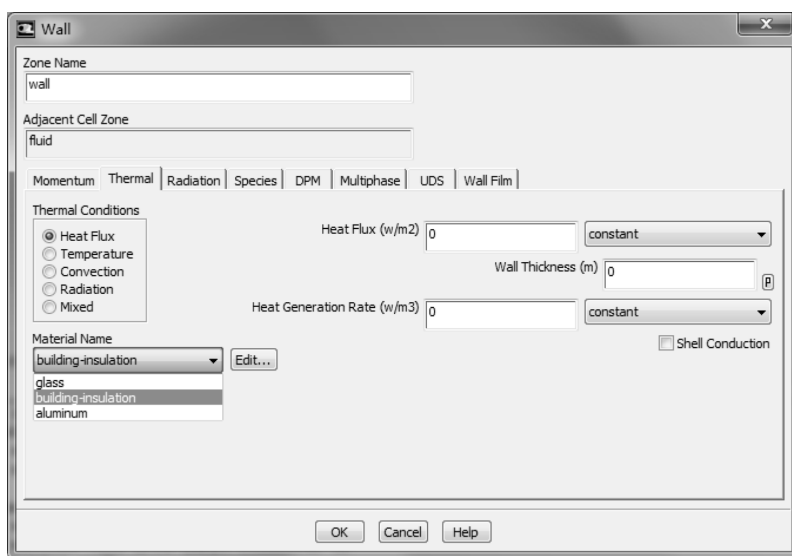


图 5-63　设置壁面材料属性

光谱可见光和红外的吸收确定了不透明壁面表面材料的辐射热物理特性。

（5）窗户边界条件设置

打开 window 边界条件面板，选择 Tab 页的“Thermal”，选择“Material Name”下拉列表框的“glass”，如图 5-65 所示。

选择 Tab 页的“Radiation”，半透明壁面允许一部分太阳辐射穿过，对于半透明壁面，选择“BC Type”下拉列表框的“semi-transparent”项，激活“Participates in Solar Ray

Tracing”选项，并输入“Direct Visible”“Direct IR”和“Diffuse Hemispherical”（漫射半球）吸收率及透过率常数，如图 5-66 所示。

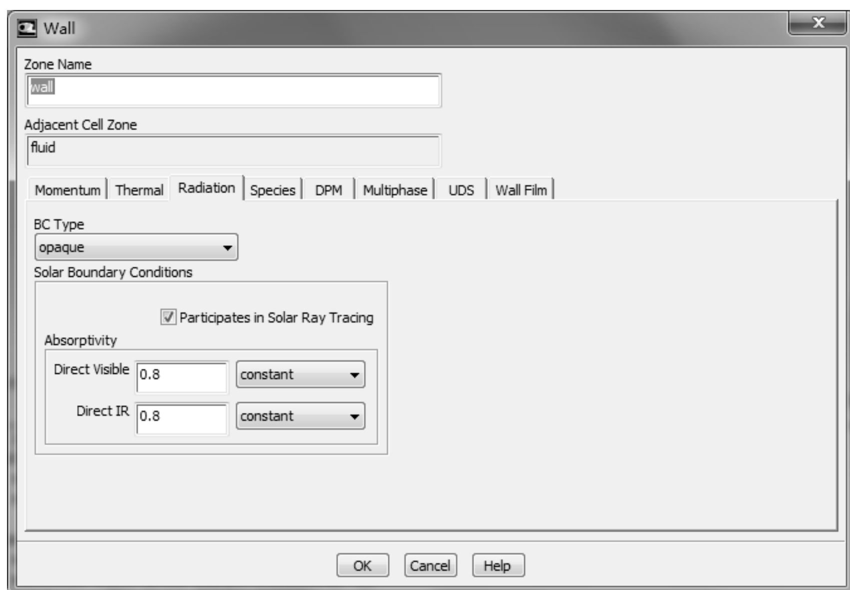


图 5-64　壁面边界条件设置

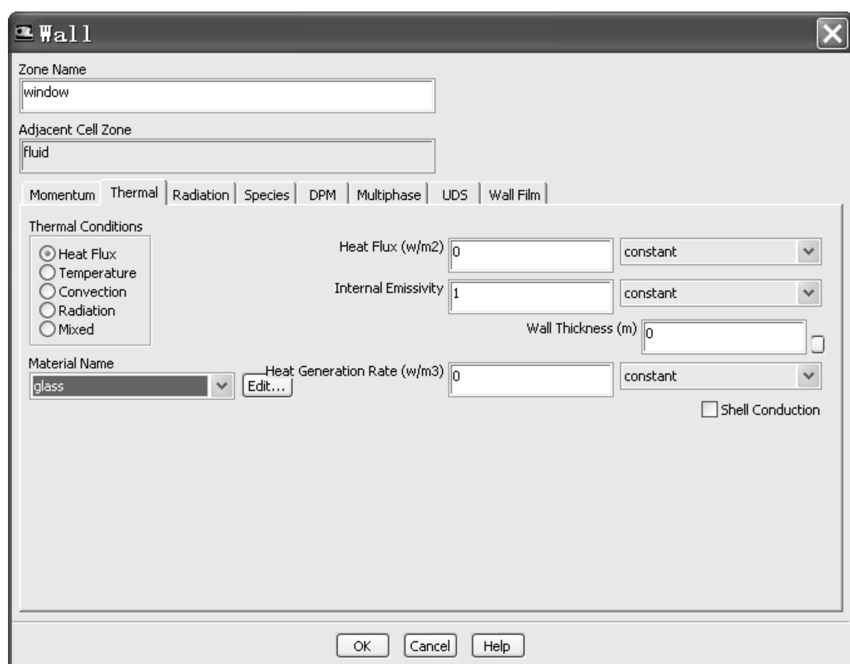


图 5-65　窗户边界条件设置

光谱可见光和红外部分的吸收和透过率，以及“遮蔽”公式（漫射半球），确定了半透明壁面表面材料的辐射热物理特性。

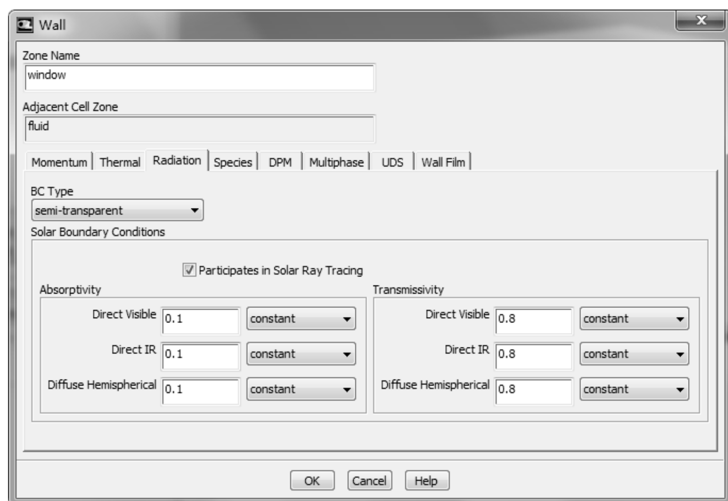


图 5-66　窗户辐射边界条件设置

5.4.4 求解条件设置

（1）定义求解方程和参数

选择“Solution”>“Solution Methods”，选择“Body Force Weighted”作为“Pressure”的离散格式，保留其他方程的默认设置，如图 5-67 所示。

保持“Solution”>“Solution Controls”设置不变，采用默认松弛因子求解该问题，如图 5-68 所示。

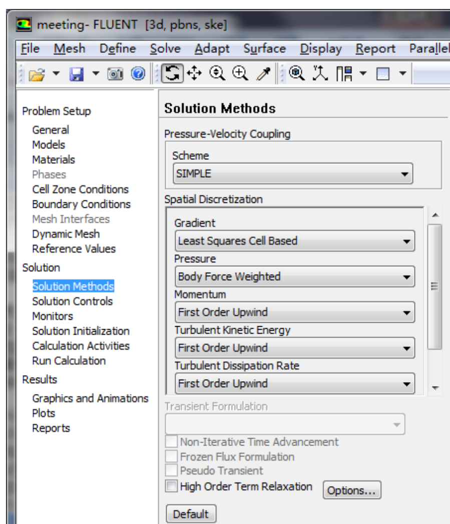


图 5-67　求解方程设置

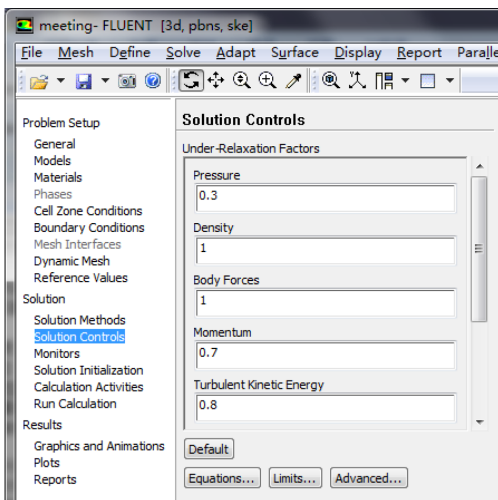


图 5-68　求解参数设置

（2）定义表面监控器

1）选择“Solution”>“Monitors”设置监控器，将监控参数设为“0.0001”，如图 5-69 所示。

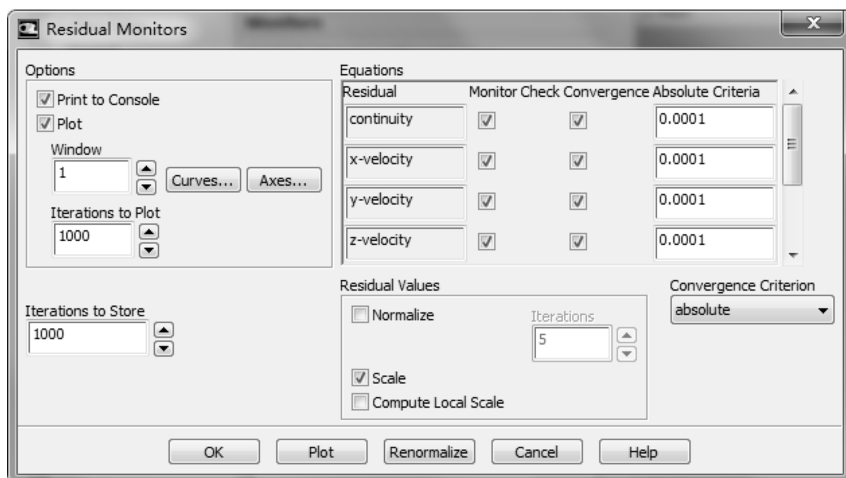


图 5-69 监控参数设置

2）选择“Solution”>“Calculation Activities”设置监控器。通过监控一些有用的表面来观察解的推进过程很有用。在这里监控通过玻璃的传热（依次选择“Report Type”>“Integral”，“Field Variable”>“Wall Fluxes...”>“Solar Heat Flux”，“Surfaces”>“window”）和出口的压力（依次选择“Report Type”>“Integral”，“Field Variable”>“Pressure...”>“Static Pressure”，“Surfaces”>“outlet”），如图 5-70 和图 5-71 所示。

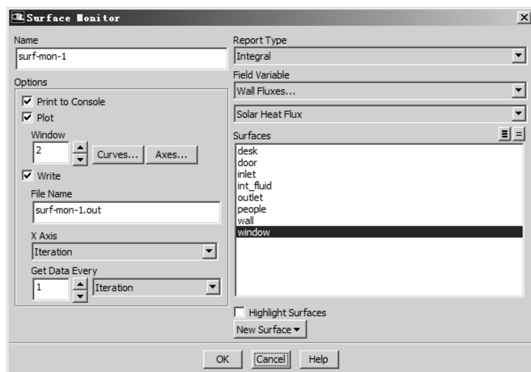


图 5-70 通过玻璃的传热监控设置

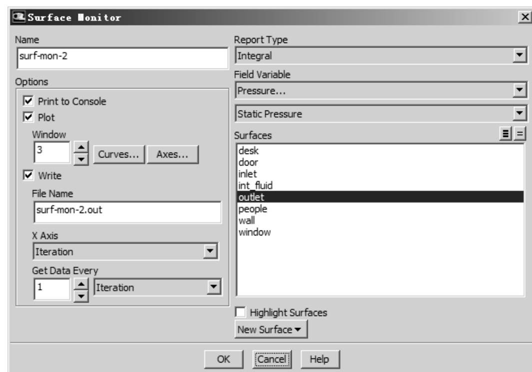


图 5-71 出口压力的监控设置

5.4.5 太阳辐射计算

由于 FLUENT 中的太阳射线跟踪算法不能进行并行处理，因此用户就必须在串行模型的情况下生成太阳数据，然后在并行仿真中使用这些数据。用户使用串行求解器对太阳载荷进行稳态求解时，只需要对用户的情况简单地设置太阳辐射模型和边界条件，然后进行仿真。

1）设置迭代步数。选择“Solution”>“Run Calculation”项，将其属性栏中“Number of Iterations”项设置为“10”，如图 5-72 所示。

2）解的初始化。选择“Solution”>“Solution Initialization”项，将其属性栏“Compute from”项设置为“inlet”边界，其余设置不变，如图 5-73 所示。



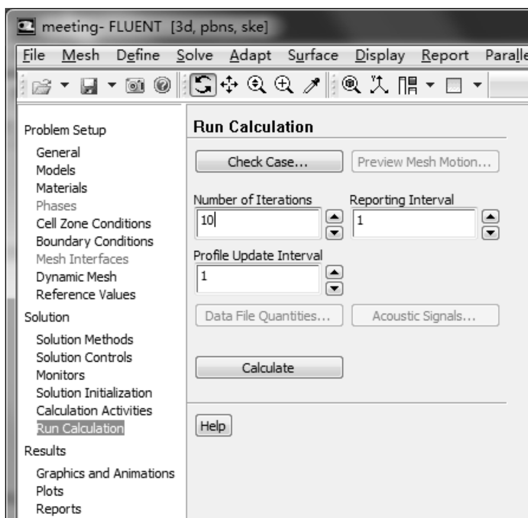


图 5-72　设置迭代步数

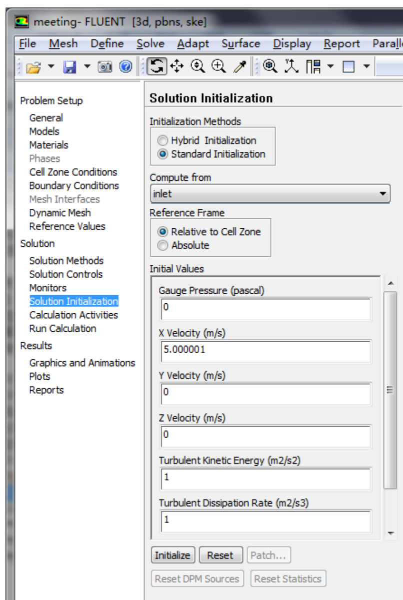


图 5-73　计算初始化

单击“Initialize”按钮，对计算进行初始化。单击“Calculate”按钮，开始计算。计算完成如图 5-74 所示。

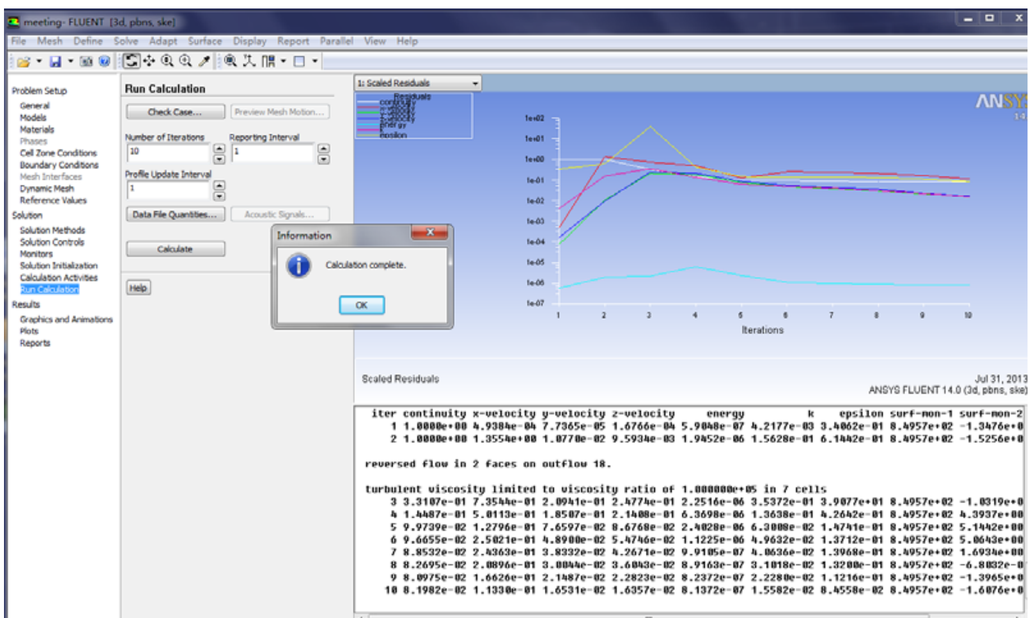


图 5-74　计算完成

3）保存文件。选择菜单项“File”>“Write” >“Case & Date”。输入文件名“meeting-room.sun.cas”，单击“OK”按钮保存文件，如图 5-75 所示，退出 FLUENT。

4）选择“开始”菜单，打开 FLUENT 软件启动界面，选择“并行计算->8 核”方式，

如图 5-76 所示。

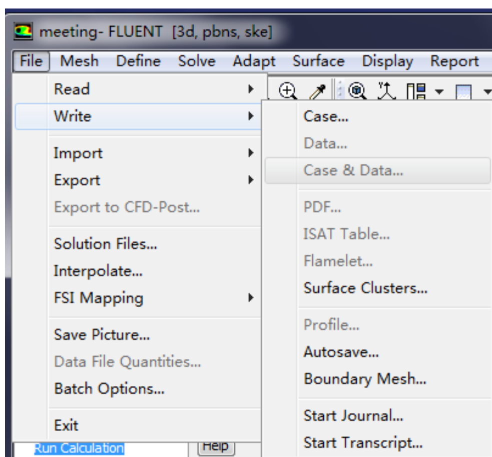


图 5-75 保存文件

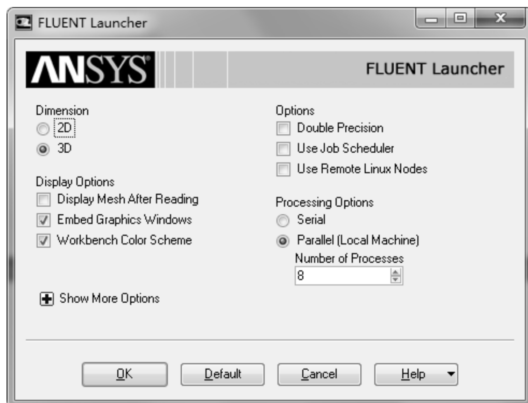


图 5-76 选择并行计算方式

5）选择菜单项“File” > “Read” > “Case & Date”，选择文件“meeting-room.sun.cas”，读入计算文件。设置 1000 步的迭代，设置如图 5-72 所示。

6）计算过程中，视图区的残差曲线和脚本区各迭代步数据随迭代计算更新。用户如果发现收敛曲线不好或是计算报错，随时可以中断计算过程（单击“Working”对话框中的“Cancel”按钮即可），如图 5-77 所示。

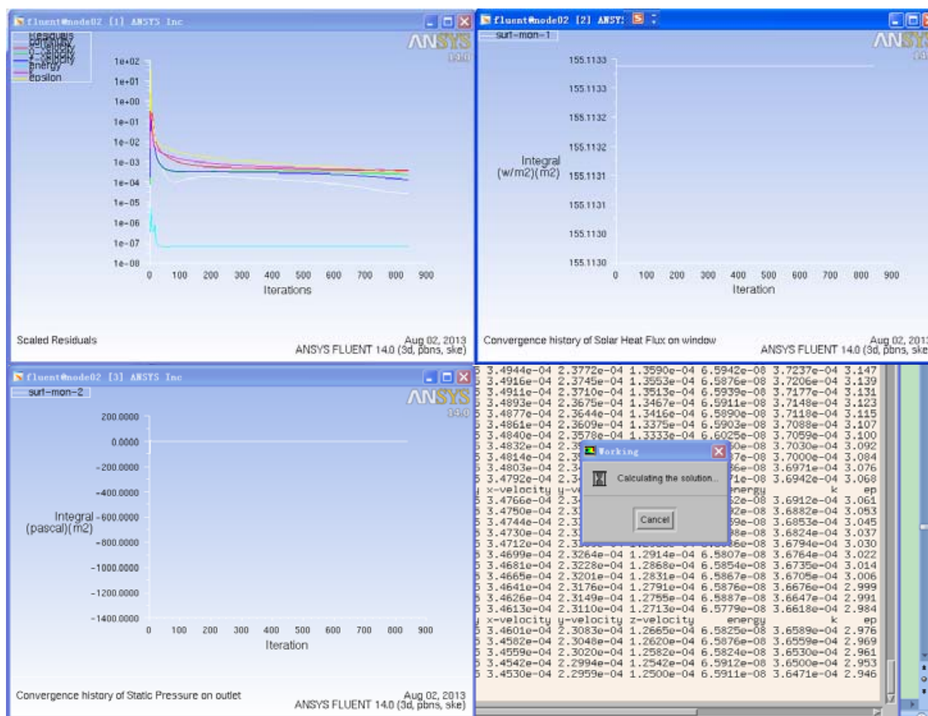


图 5-77 残差曲线和脚本区各迭代步数据

7）计算进行到第 1000 步时，“Information”对话框显示计算完成的信息，单击“OK”按钮确认。

8）外墙温度分布图。会议室模型在太阳辐射条件下计算得到的外墙温度分布如图 5-78 所示。温度最高点位于空调出风口的最上方，为 36℃，这是因为此处空气流动较差。玻璃上的温度最高为 31℃，下面将加入表面辐射（S2S）模型来计算模型内部表面之间的辐射热交换。

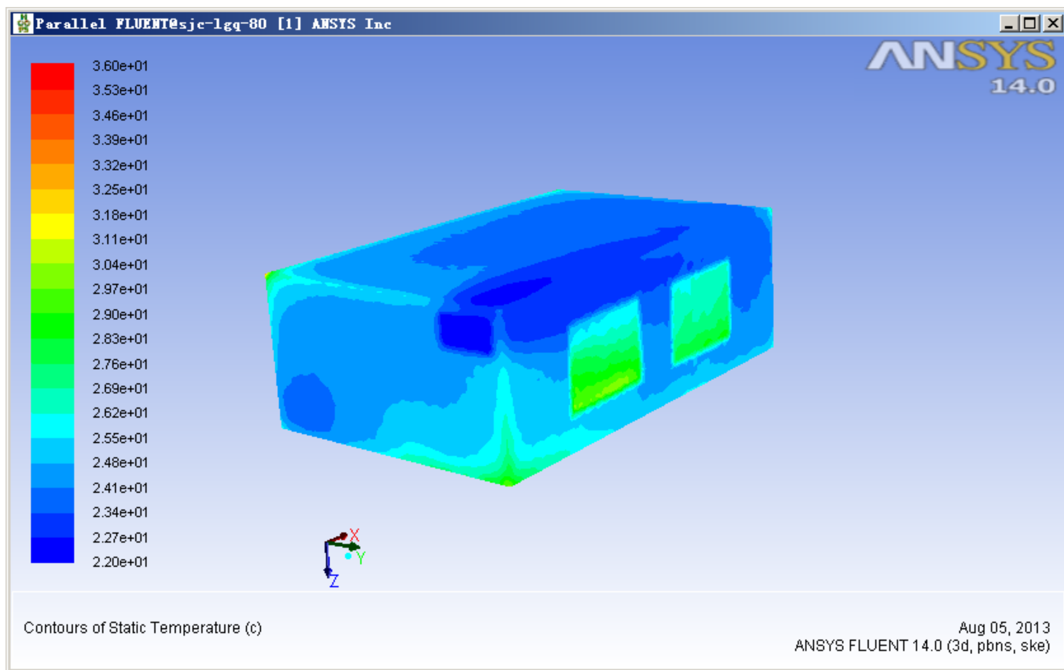


图 5-78　外墙温度分布

5.4.6 表面辐射（S2S）计算

激活表面辐射（S2S）模型来计算模型内部表面之间的辐射热交换。

1）激活表面辐射（S2S）模型。选择“Problem Setup”>“Models” >“Radiation”，选择“Surface to Surface（S2S）”，单击“OK”按钮，激活表面辐射（S2S）模型。

用户可控制辐射场在连续相迭代推进时的更新频率。“Energy Iterations per Radiation Iteration”（每次辐射迭代中能量迭代数）设置的默认值为“10”，表示能量方程迭代 10 次辐射迭代 1 次。加大此数值可加速计算过程，但是整个向量场的收敛可能会减慢。这里采取默认值。

用户可以通过更改“Number of S2S Sweeps”来控制全局迭代时辐射计算的最大扫描次数。扫描次数的默认值为 1，表示辐射计算仅被更新一次。若增加此数值，则表面上辐射强度将被更新多次，直到辐射残差达到收敛标准或者是达到了设定的最大扫描次数。这里设置“Number of S2S Sweeps”为“5”。

Tolerance 参数（误差参数，默认值为 0.01）确定了何时辐射强度的迭代达到了收敛标

准。误差参数定义为表面上辐射强度在相邻两次 S2S 的迭代中差值的模，这里采取默认值。如图 5-79 所示。

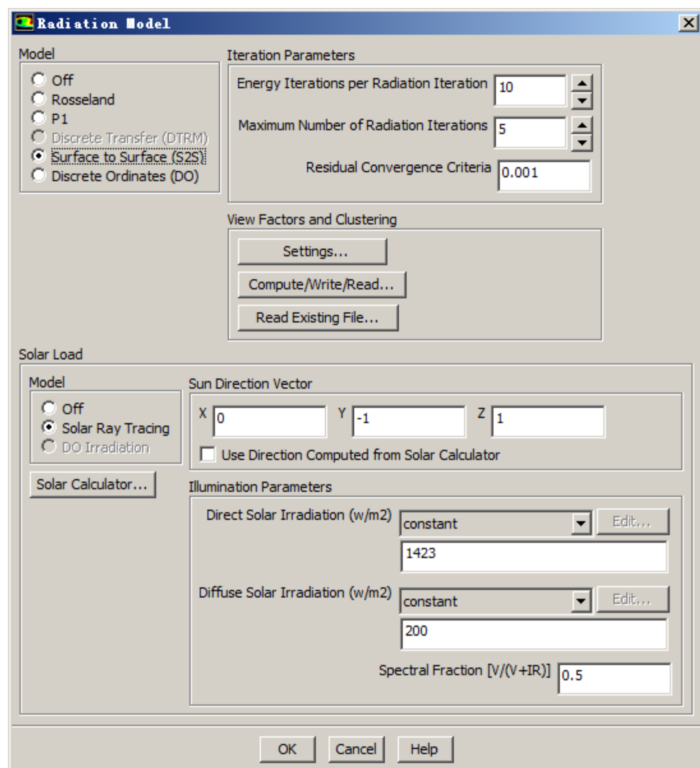


图 5-79 激活 S2S 辐射模型

2）设定角系数和表面束参数。用户可以使用“View Factors and Cluster Parameters”面板来设置 S2S 模型的角系数和表面束参数。

选择“Problem Setup” > “Models” > “Radiation”，单击“View Factors and Clustering”栏下的“Setting...”，在弹出的对话框中通过设定“Faces per Surface Cluster for Flow Boundary Zones”，确定辐射面的数量。在 Fluent 中默认设置值为“1”，表示表面束的数目等于边界面元的数目。对于大规模的计算，用户可能会希望减少表面束的数目，以减小角系数文件的大小和对内存的需求。但是，减小表面束的数量会减小计算精度。在这里将“Faces per Surface Cluster for Flow Boundary Zones”设为“10”，并单击“Apply to All Walls”按钮，如图 5-80 所示。

这样用户指定的“Faces per Surface Cluster for Flow Boundary Zones”值将应用到模型中与流体区域相毗连的所有壁面区域上。

3）选择“Zones Participating in View Factor Calculation”的“Select...”项，在弹出的对话框中选择辐射计算中参与计算的区域，以及不参与计算的区域，如图 5-81 所示。

4）选择“View Factors and Clustering”下的“Computer/Write/Read...”，将自动计算、存储和读入角系数，如图 5-82 所示，这个过程将需要几分钟。

5）设置二阶计算方程。选择“Solution” > “Solution Methods”，保持 Pressure 设置不

变，其他方程均选择“Second Order Upwind”，如图 5−83 所示。

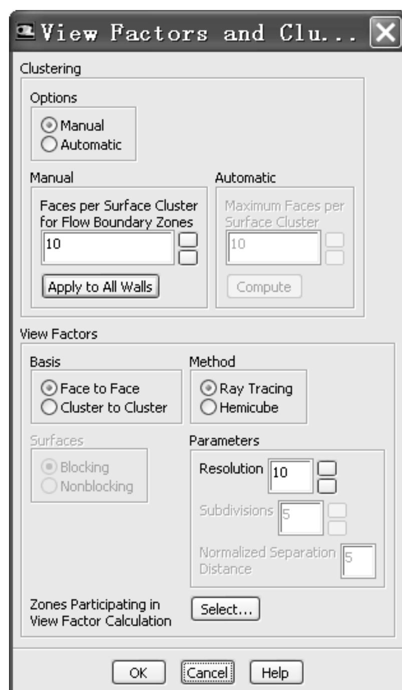


图 5−80　设定角系数和表面束参数

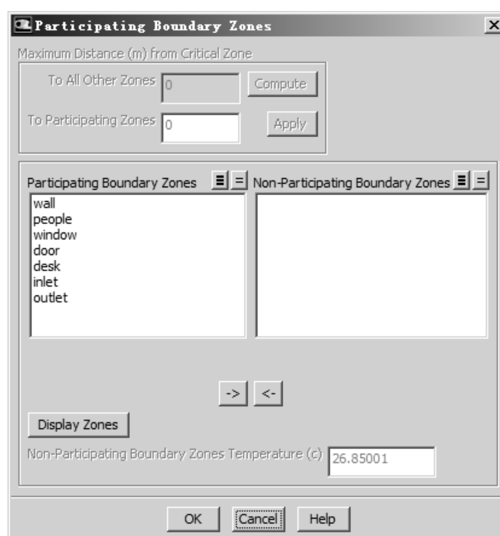


图 5−81　设定参与辐射计算的区域

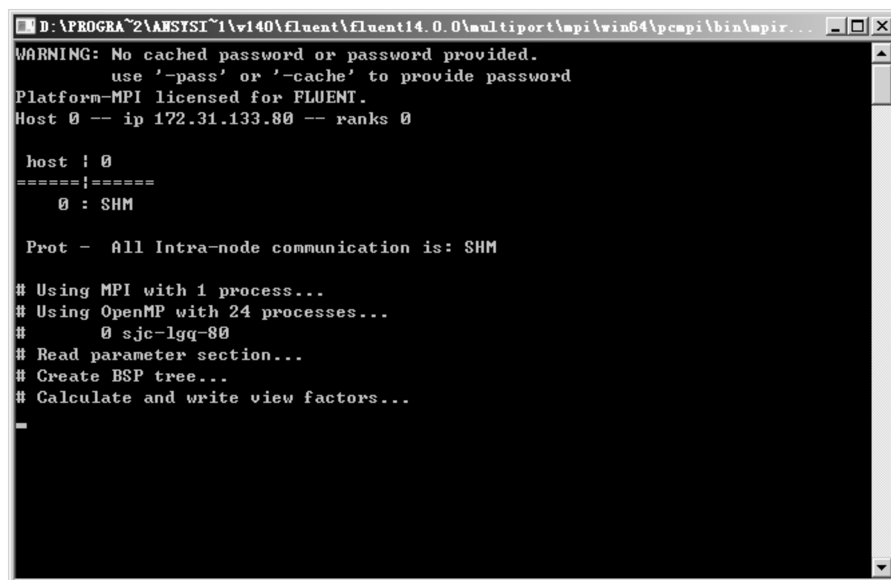


图 5−82　角系数的计算、存储和读入

6）计算另一个 1000 步的迭代。设置如图 5−72 所示。

7）保存结果文件。选择菜单项“File”＞ “Write”＞“Case & Data...”，如图 5−84 所示。

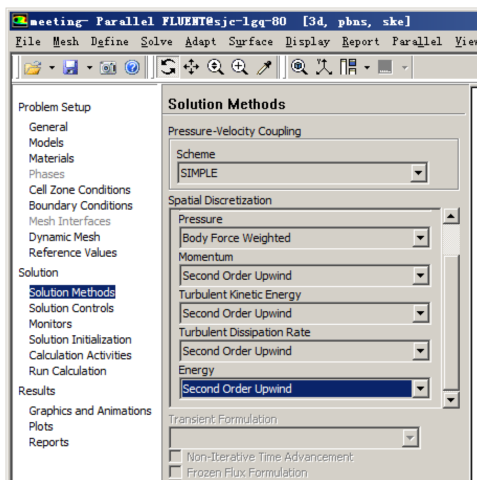


图 5-83 二阶计算方程

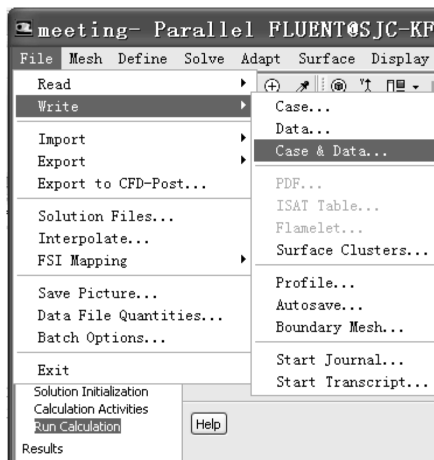


图 5-84 保存结果文件

8）如图 5-85 所示，输入文件名“meeting-room.s2s.cas”，单击“OK”按钮，保存文件。

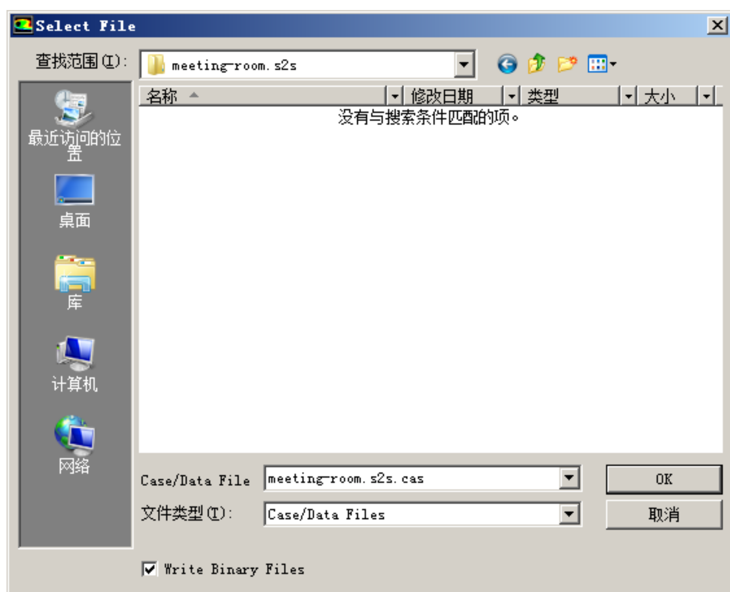


图 5-85 输入结果文件名称

5.5 计算结果分析

1）在 CFD-Post 软件中导入计算结果文件，进行室内空气流场的后处理。如图 5-86 所示，选择菜单项“File”>“Load Results...”，打开“Load Results File”对话框。

2）如图 5-87 所示，选择文件“meeting-room.s2s.cas”，单击“OK”按钮导入该文件。

3）如图 5-88 所示，弹出“Global Variable Ranges”对话框，提示用户注意变量范围的预设置方法。单击“OK”按钮确认操作。

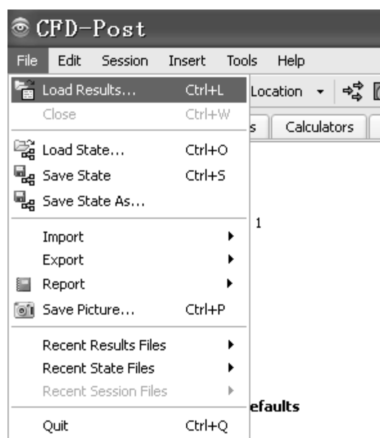


图 5-86　导入结果文件

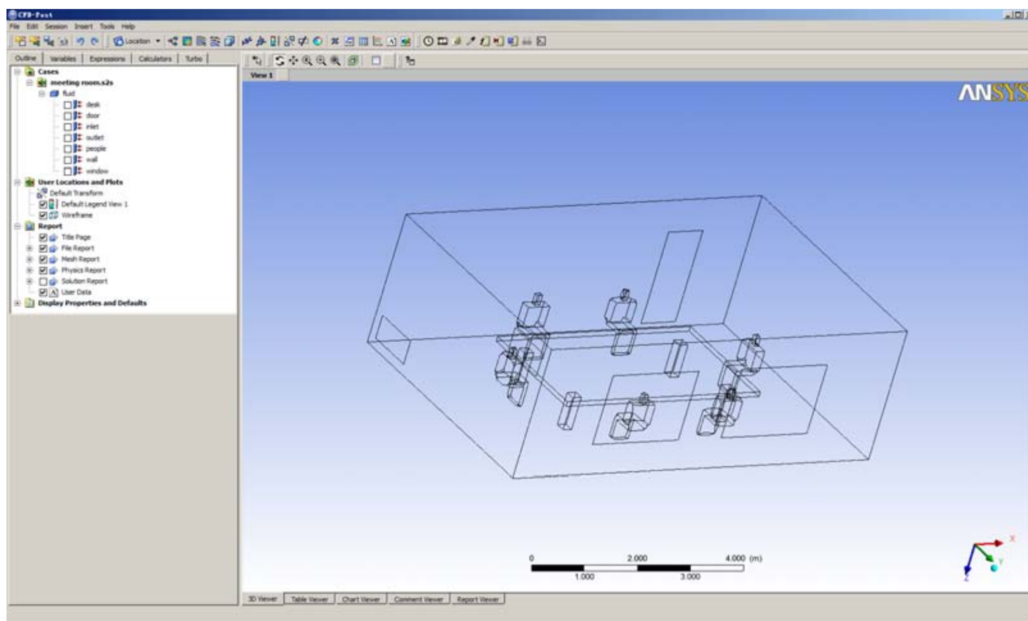


图 5-87　导入文件“meeting-room.s2s.cas”



图 5-88　“Global Variable Ranges”对话框

5.5.1 室内空气流场分布

1）在视图区打开边框模式的计算模型，同时左侧项目树出现所有边界的列表。选择工具栏“Location”>“Plane”工具，建立室内流速分布截面，如图 5-89 所示。

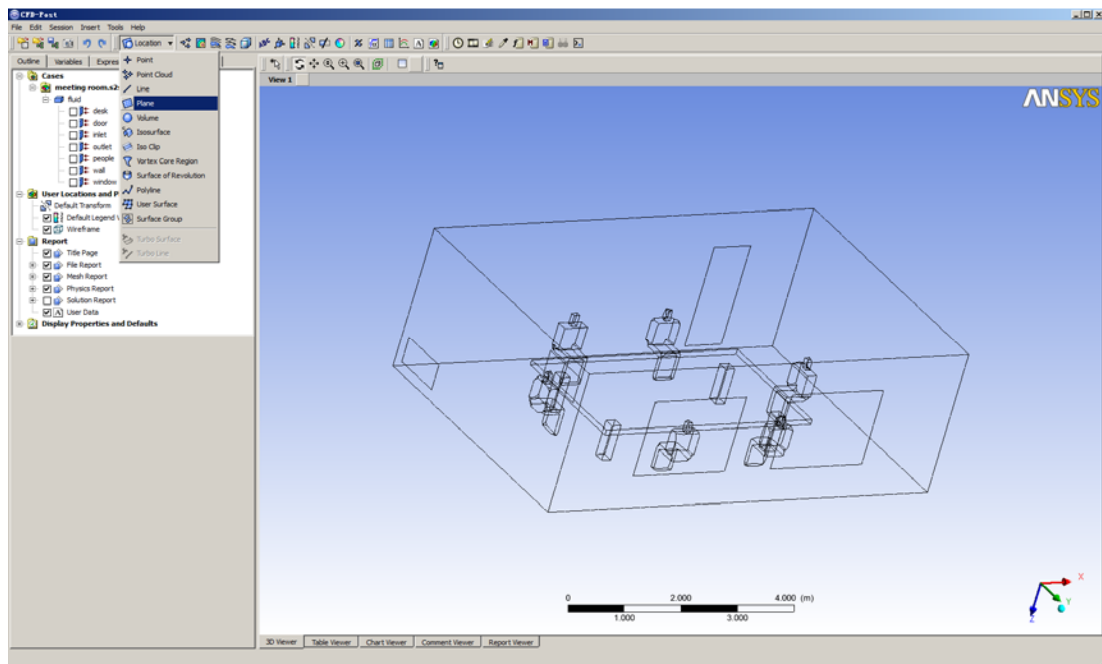


图 5-89 建立室内温度分布截面

2）如图 5-90 所示，在弹出的“Insert Plane”对话框中，保持默认文件名，单击“OK”按钮确认操作。



图 5-90 保持默认文件名

3）在新建的“Plane 1”属性栏中，将“Method”项设置为“XY Plane”，将“Z”值设置“0.4m”（即室内离地高度为 1m 的水平面）。单击“Apply”按钮，视图区生成“Plane 1”，所生成的室内流速分布截面如图 5-91 所示。

4）生成速度分布云图。单击按钮，在弹出的“Insert Contour”对话框中输入文件名“V Plane 1”，如图 5-92 所示。

5）设置速度分布云图的相关参数。将“V Plane 1”属性栏中的“Locations”项设置为“Plane 1”边界，将“Variable”项设置为“Velocity”，将“Range”设置为“Local”，将“# of Contours”设置为“30”。单击“Apply”按钮，视图区生成的速度分布云图如图 5-93 所示。

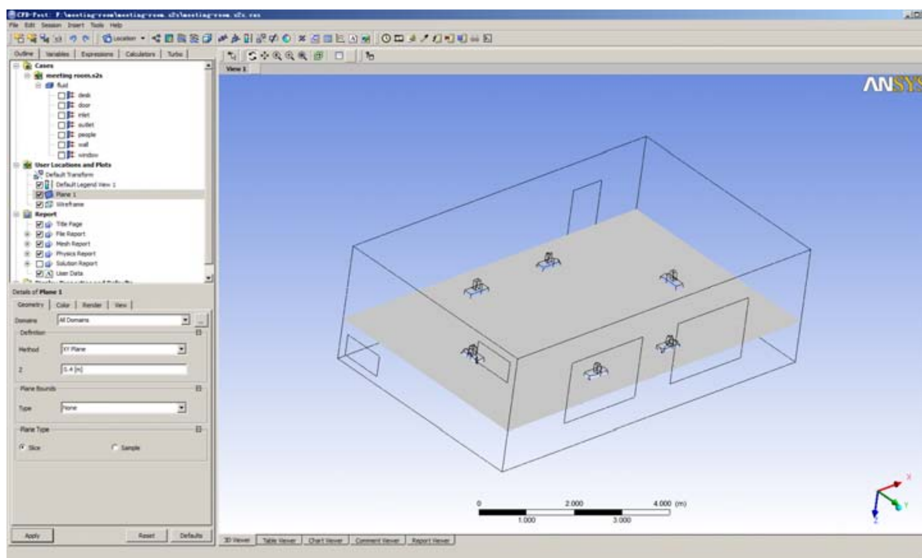


图 5-91　室内速度分布截面



图 5-92　输入文件名

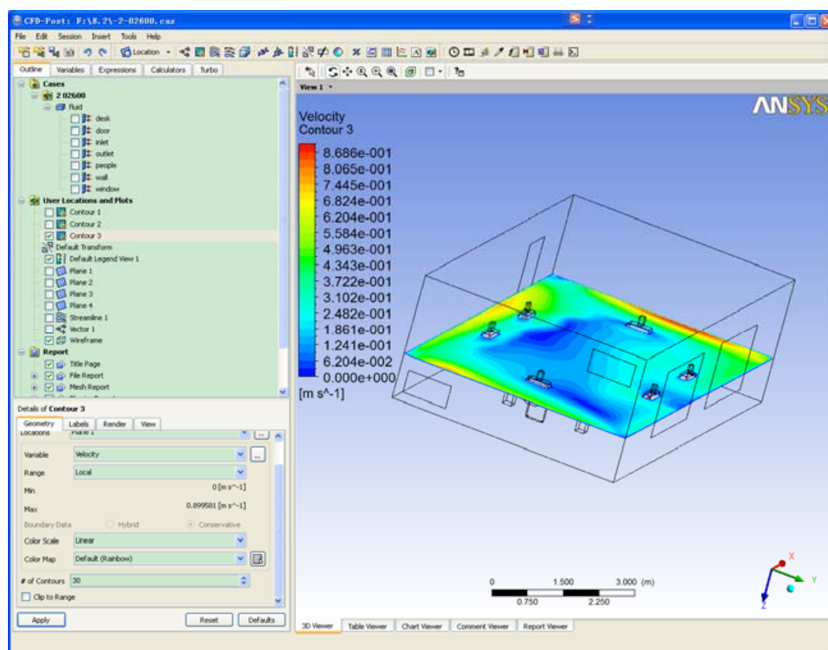


图 5-93　速度分布云图

5.5.2 室内空气温度场分布

1）取消选择项目树中的“V Plane 1”项，视图区不再显示速度云图。

2）生成温度分布云图。单击按钮，在弹出的“Insert Contour”对话框中输入文件名“T Plane 1”，单击“OK”按钮，建立窗口区域的温度分布云图，如图 5-94 所示。



图 5-94 建立窗口区域的温度分布云图

3）将“Contour Window”属性栏中的“Locations”项设置为“Plane 1”边界，将“Variable”项设置为“Temperature”，将“Range”设置为“Local”，将“# of Contours”设置为“30”，单击“Apply”按钮，视图区生成的 Plane 1 温度分布云图如图 5-95 所示。

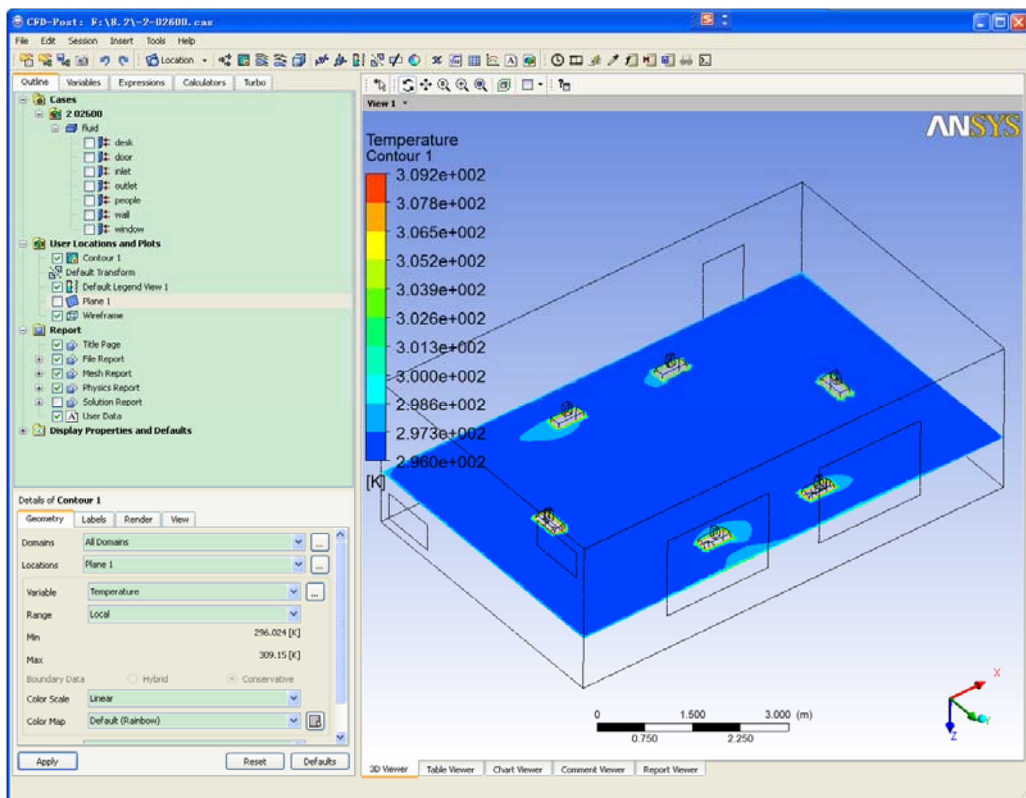


图 5-95 温度分布云图

4）将“Contour Window”属性栏中的“Locations”项设置为“door、inlet、outlet、wall、window”，会议室模型在 S2S 辐射条件下计算得到的外墙温度分布如图 5-96 所示。温



度最高点位于玻璃上，为 30.4℃。与仅加载太阳辐射模型计算得到的结果比较可知，外墙的温度分布发生了明显的变化。

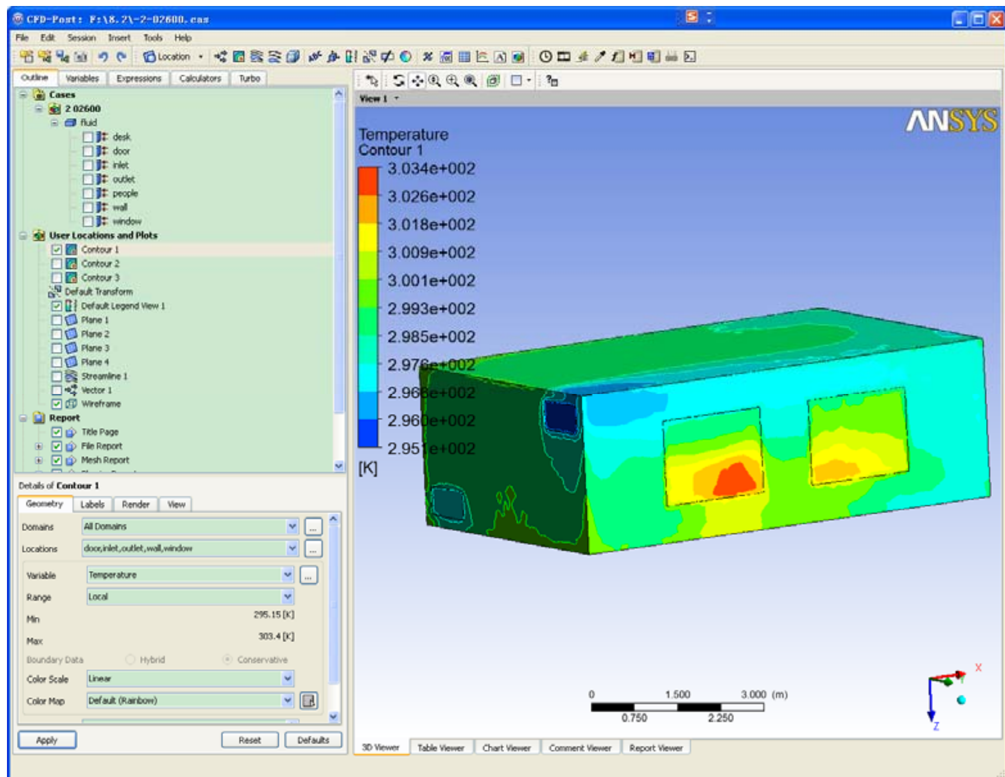


图 5-96　S2S 辐射下外墙温度分布图

5.5.3 室内空气流线分布

1）单击按钮，绘制流场中的流线图。在弹出的对话框中输入文件名“Streamline room”，如图 5-97 所示。



图 5-97　绘制流线图

2）单击“OK”按钮，展开“Streamline room”的属性栏。将“Start From”项设置为“inlet”边界，将“# of Points”项设置为“50”，单击“Apply”按钮确认操作。温度值范围选用“Local”，用户可以从项目树中找到新创建的“Streamline room”项。视图区中绘制完成的流线图如图 5-98 所示。仅加载太阳辐射模型计算得到的室内空气流线分布，如图 5-99 所示。比较可知，室内流场分布发生了明显的改善。

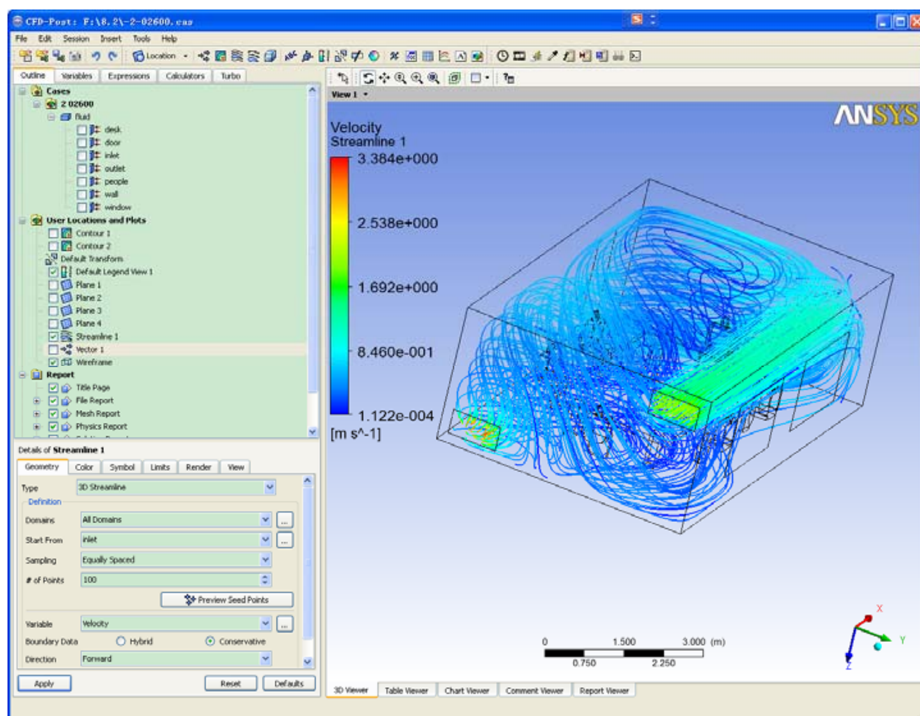


图 5-98 S2S 辐射下会议室内流线图

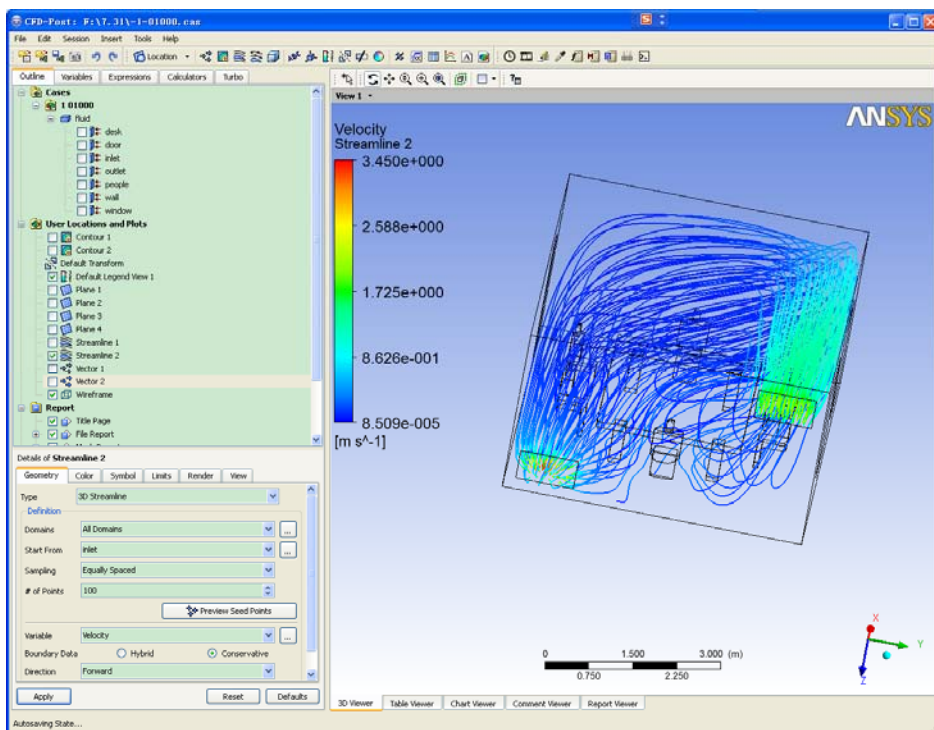


图 5-99 太阳辐射下会议室内流线图



3）保存后处理文件。如图 5-100 所示，选择菜单项“File” > “Save State”。在“Save State”对话框中输入文件名“meeting room.s2s.cst”，单击“Save”按钮保存文件，如图 5-101 所示。

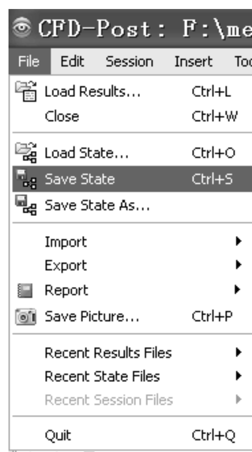


图 5-100　保存后处理文件

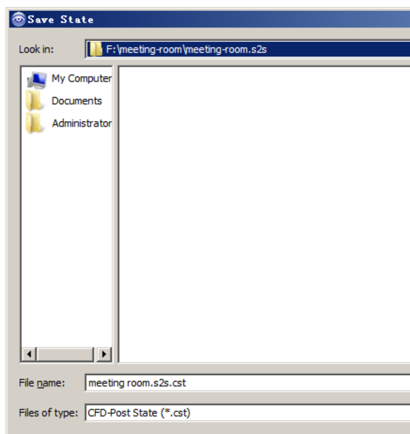


图 5-101　输入文件名

注意：本章对应的源文件详见光盘文件夹“meeting-room”。

第 6 章　无预混燃烧

本章主要内容：

本章主要介绍 FLUENT 软件在燃烧以及化学反应方面的应用。通过无预混燃烧的实例讲解，读者可以学会利用 FLUNET 求解工程实践中的燃烧以及化学反应问题。

本章学习目标：

✧ 了解无预混燃烧的基本知识。

✧ 掌握无预混燃烧计算设置流程求解及后处理的技巧。

本章针对天然气在一个 300 kW 的漩涡稳定燃烧器中的燃烧情况进行计算。该炉为垂直发射、八边形横截面，包含一个圆锥形的炉罩和一个圆柱形的排气管。炉壁采用耐火材料内衬或水冷。燃烧器包含 24 径向燃料端口和一个中心挡板。空气经由一个环形入口引入，可动漩涡产生器用于产生漩涡。

燃烧室为二维轴对称假设的燃烧器，其尺寸示意图如图 6-1 所示。各边界的输入曲线、气体的速度入口边界条件和温度边界条件均是基于实验数据。

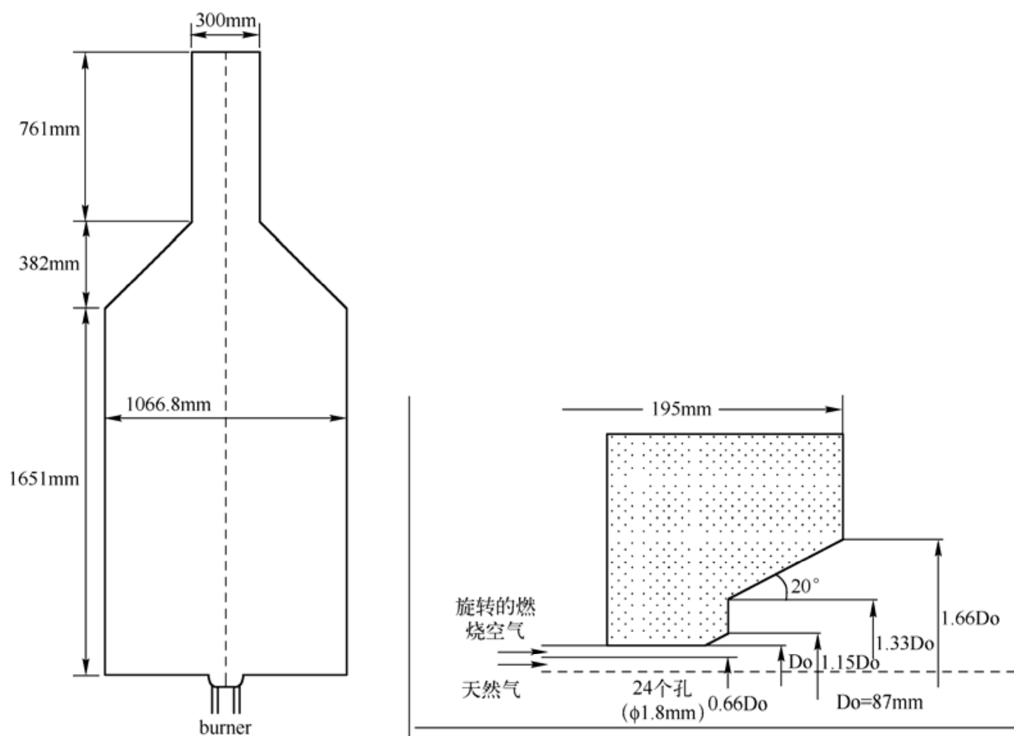


图 6-1　燃烧室尺寸

6.1　无预混燃烧概述

在无预混燃烧中，燃料和氧化剂以相异流进入反应区。这与预混燃烧系统截然不同。在预混燃烧系统中，反应物在燃烧以前以分子水平混合。无预混燃烧的例子包括甲烷燃烧、粉煤炉和内部燃烧柴油（压缩）发动机。

在一定假设条件下，热化学可减少为一个单一的参数——混合分数。混合分数用 *f* 表示，是来自燃料流的质量分数。换句话说，混合分数就是在所有组分（CO_2、H_2O、O_2 等）里，燃烧和未燃烧燃料流元素（C、H 等）的局部质量分数。因为化学反应中元素是守恒的，所以这种方法极好。反过来，质量分数是一个守恒的数量，因此其控制输运方程不含源项。燃烧被简化为一个混合问题，并且与近非线性平均反应率相关的困难可以避免。一经混合，即可用层流小火焰（Laminar Flamelet）模型将化学反应模拟成为化学平衡或近化学平衡。

1．平衡混合分数/PDF 模型

非预混模拟方法包括解一或两个守恒量（混合分数）的输运方程，不解单个组分方程。取而代之的是每个组分的浓度用预混分数场得到。热化学计算在 prePDF 中进行，并列成表以便于在 FLUENT 中查询。紊流和化学的相互作用考虑为一个概率（几率）密度函数（PDF）。

2．非预混方法的优点

非预混模拟方法已被明确用于模拟进行快速化学反应的紊态扩散火焰的研究。非预混模型允许预测中间（基本）组分、溶解效应和严格的紊流化学耦合。因为不需要解大量的组分输运方程，该方法在计算上很有效。当潜在的假设有效时，非预混方法要优先于有限率公式。

3．非预混方法的局限

非预混方法仅能用于当反应流动系统满足以下几个要求时：

1）流动是湍流。

2）反应系统包括一个燃料流、一个氧化剂流，并且随意包括一个次要流（另外一个燃料或氧化剂，或者一个非反应流）。

3）化学动力学必须迅速以使流动接近化学平衡。

注意：非预混模型仅能与分离求解器使用，不能与耦合求解器使用。

6.2　模型设置

启动 FLUENT 软件，在“FLUENT Launcher”对话框中选择 2D 二维计算模式，激活“Double Precision”双精度模式，选择“Serial”选项，如图 6-2 所示。

1．网格导入及检查

1）选择菜单项“File”>“Read”>“Mesh…”，打开文件名“berl.mesh”读取网格，如图 6-3 和图 6-4 所示，单击“OK”按钮确认操作 。

2）选择左侧树形菜单中的“Problem Setup”>“General”>“Check”项，软件右下侧显示出网格检查结果，如图 6-5 所示。注意，报告中的“minimum volume”一项应为正值。

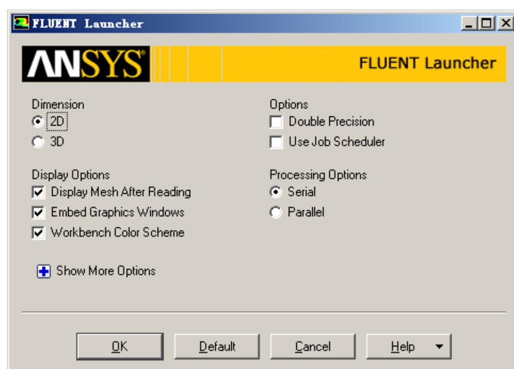


图 6-2 FLUENT 启动界面

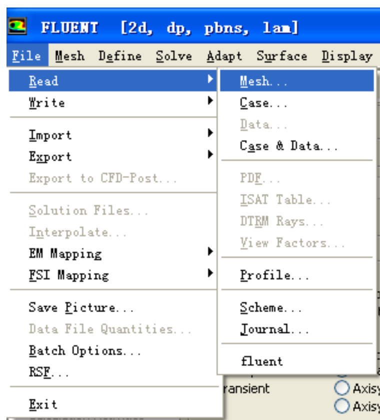


图 6-3 读取网格

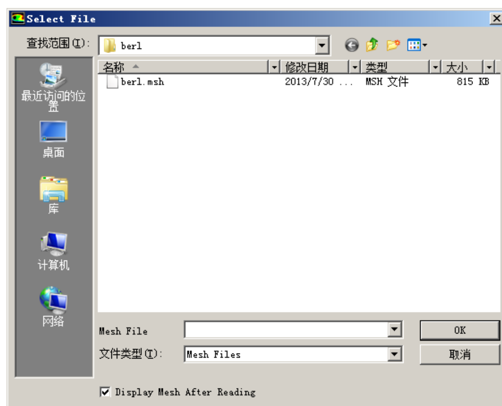


图 6-4 输入文件名

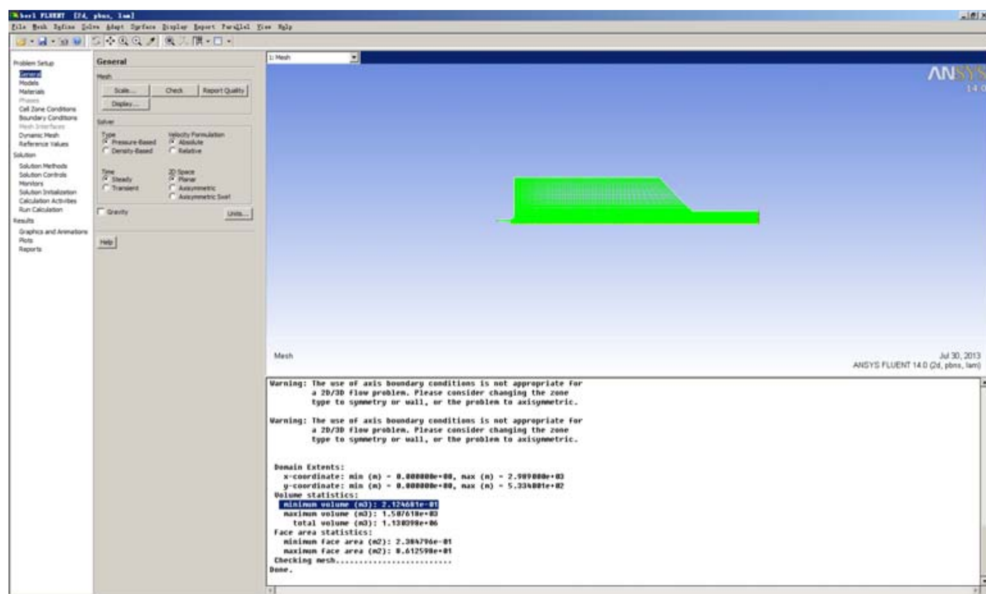


图 6-5 网格检查

3）选择左侧树形菜单中的“Problem Setup”>“General”>“Scale…”项，弹出“Scale Mesh”对话框，如图 6-6 所示。将“View Length Unit In”项修改为“mm”，同时将“Mesh Was Created In”项修改为“mm”。单击“Scale”按钮，“Domain Extents”栏中的坐标范围修改为图 6-6 所示的值。

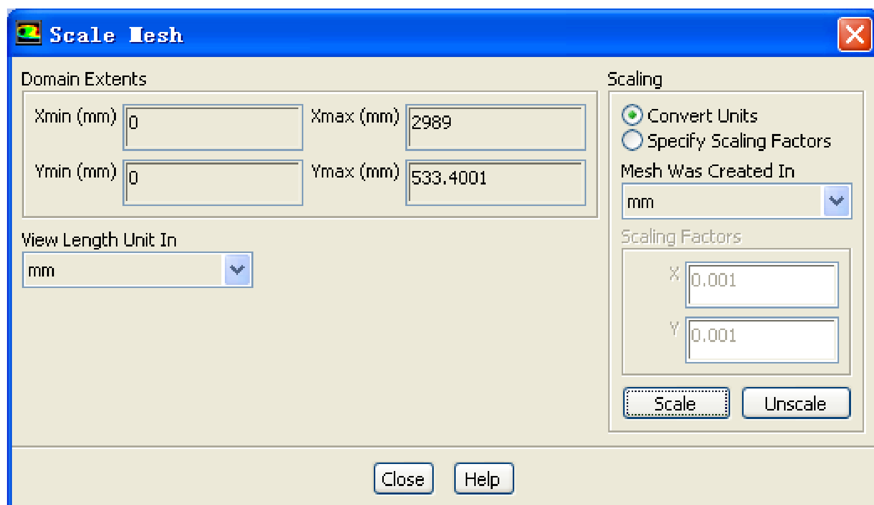


图 6-6　坐标修改

4）可再次选择左侧树形菜单中的“Problem Setup”>“General”>“Check”项，对网格质量进行检查。

5）下面对导入的网格进行镜像处理，选择菜单项“Display”>“Graphic and Animations…”或树形菜单项“Results”>“Graphic and Animations”，如图 6-7 所示。

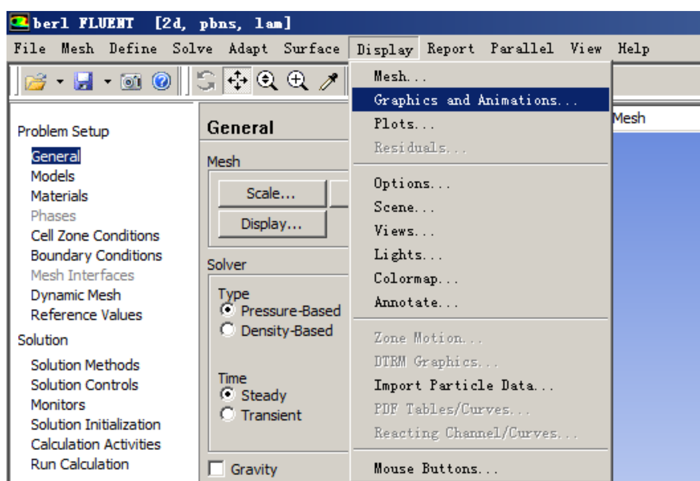


图 6-7　Graphic and Animations

6）单击“Views…”按钮，弹出“Views”对话框，如图 6-8 所示。在“Mirror Planes”栏中选择“axis-2”项，单击“Apply”按钮，视图区中的网格完成镜像。

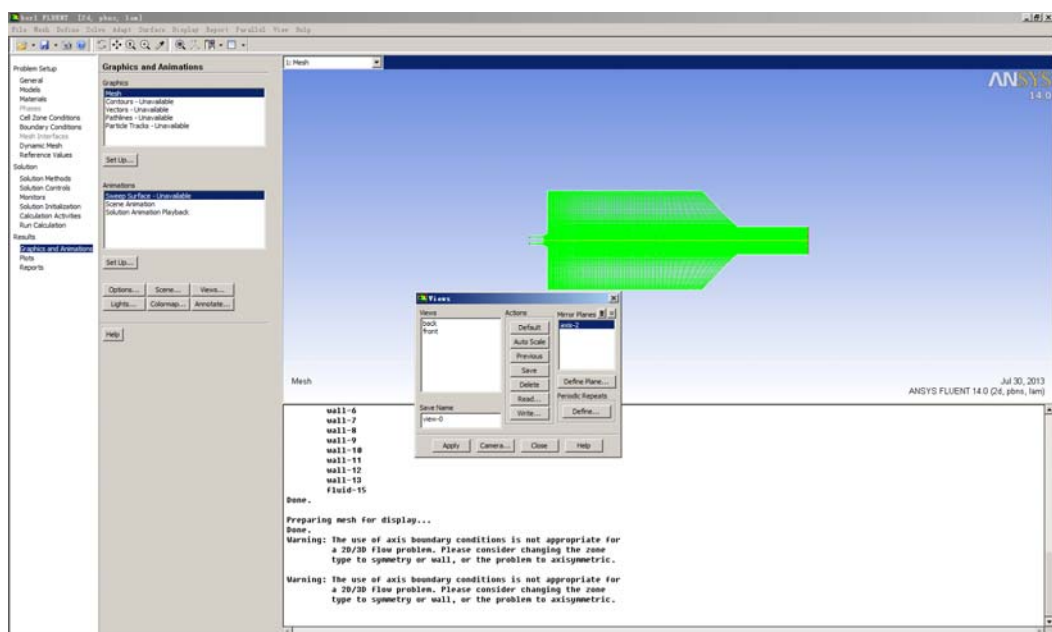


图 6-8　Views 对话框

7）更改计算模型，选择“Type”栏中的“Pressure-Based”项，同时选择“2D Space”栏中的“Axisymmetric Swirl”项，如图 6-9 所示。

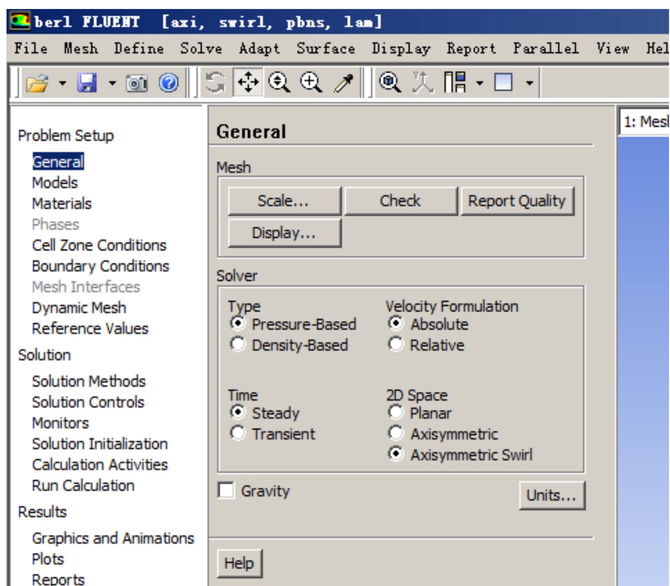


图 6-9　更改计算模型

2．模型设置

1）双击树形菜单“Problem Setup”>“Models”>“Energy”>“Edit...”项，弹出“Energy”对话框，激活“Energy Equation”项，如图 6-10 所示。单击“OK”按钮确认操作。



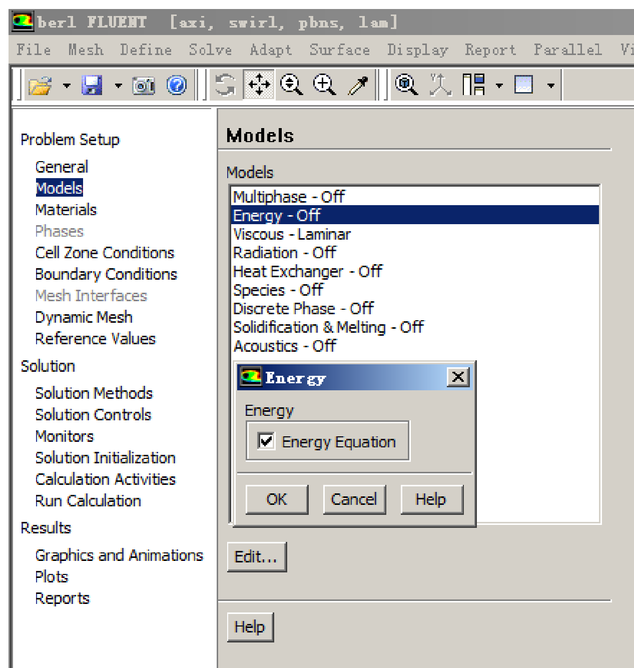


图 6-10　激活“Energy Equation”项

2）双击树形菜单“Problem Setup”>“Models”>“Viscous”>“Edit...”项，弹出“Viscous Model”对话框，在“Model”栏中选择“k-epsilon (2eqn)”项，如图 6-11 所示。其预设值保持不变，单击“OK”按钮确认操作。

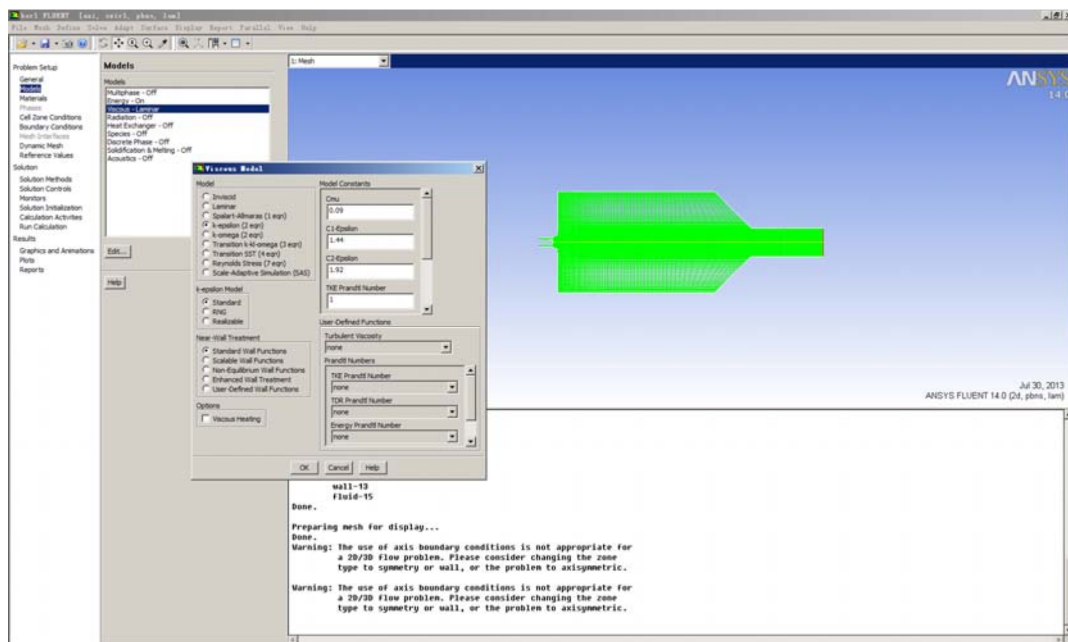


图 6-11　选择 k-epsilon 模型

3）双击树形菜单“Problem Setup”>“Models”>“Radiation”>“Edit...”项，弹出“Radiation Model”对话框，在“Model”栏中选择“P1”项，如图 6-12 所示。其余设值保持不变，单击“OK”按钮确认操作。

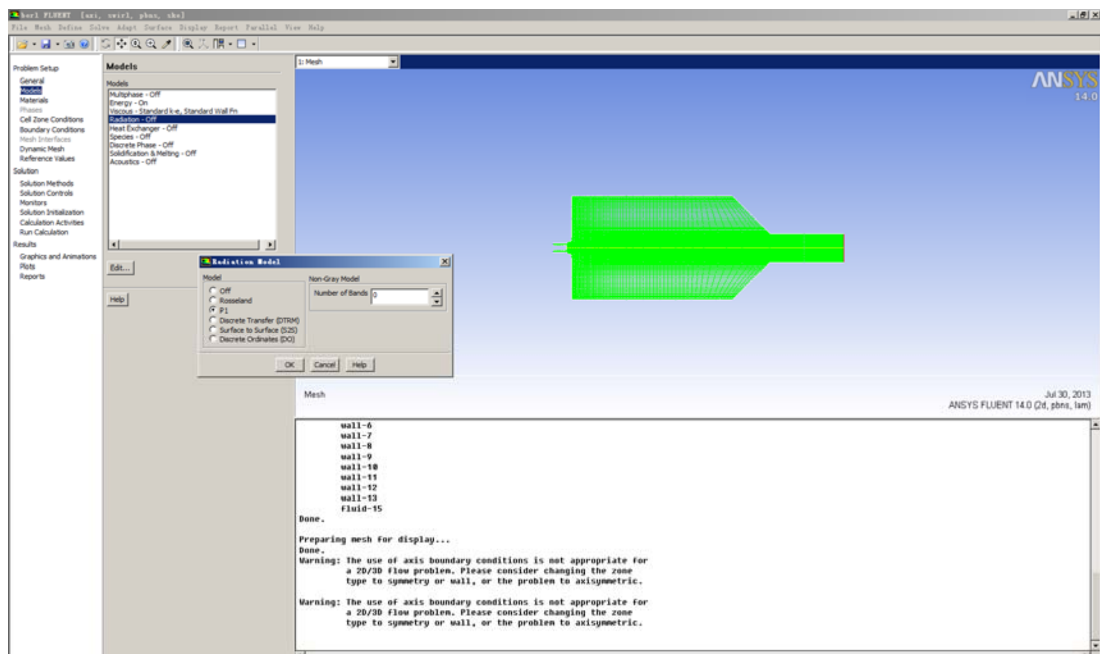


图 6-12 选择“P1”模型

4）此时，软件自动弹出图 6-13 所示的对话框，提醒用户确认已经更改的材料属性和求解方法。

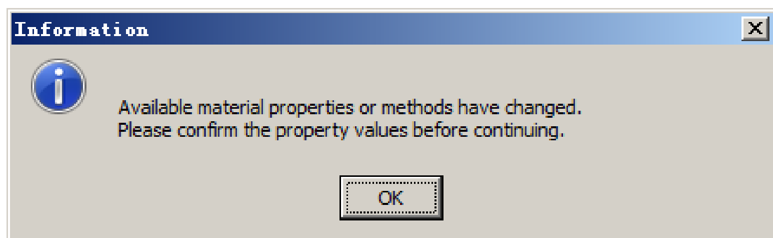


图 6-13 确认信息

5）双击树形菜单“Problem Setup”>“Models”>“Species”>“Edit...”项，弹出“Species Model”对话框，在“Model”栏中选择“Non-Premixed Combustion”项，如图 6-14 所示。其余设值保持不变。

6）在“PDF Options”栏中激活“Inlet Diffusion”项，在进口设置进口扩散选项。

7）在“PDF Table Creation”栏的“Chemistry”页中默认选择“Equilibrium”和“Non-Adiabatic”项，将“Fuel Stream Rich Flammability Limit”项设置为“0.064”，其余选项保持不变，如图 6-14 所示。

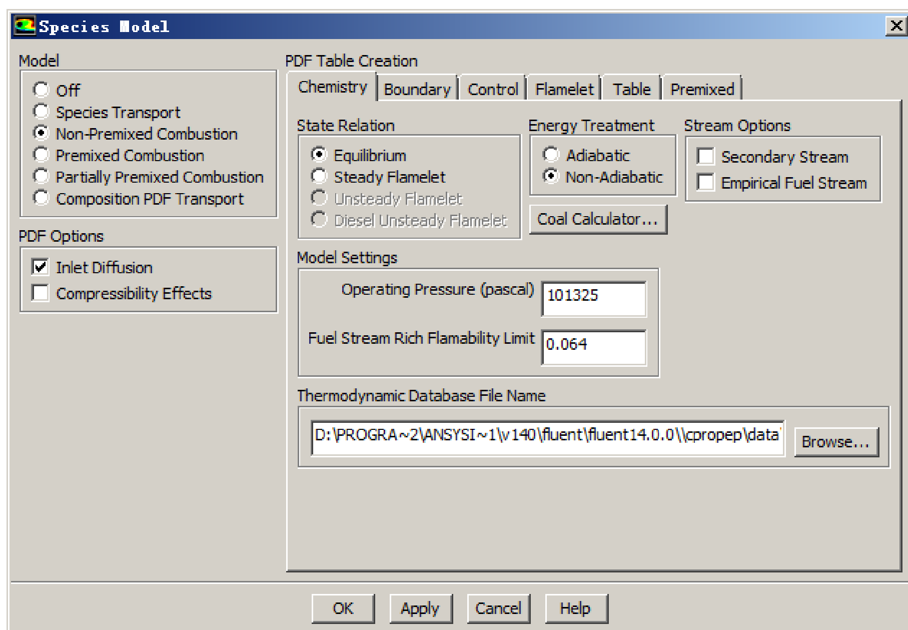


图 6-14 “Species Model”对话框

8）切换到“Boundary”页，在“Boundary Species”项中输入“c2h6”，单击“Add”按钮添加该材料，如图 6-15 所示。重复以上操作，添加 c3h8、c4h10 和 co2 这三种材料。

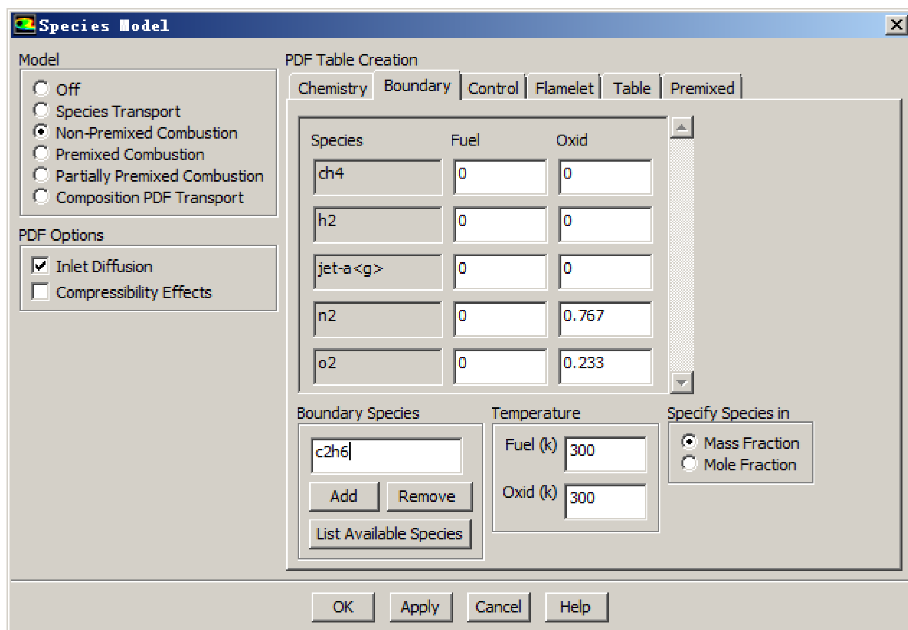


图 6-15 添加燃烧相关材料

9）在“Specify Species in”项中选择“Mole Fraction”项，采用摩尔分数表达方式设置氧气浓度，如图 6-16 所示。本例中保持 n2 和 o2 的比例为默认设置。

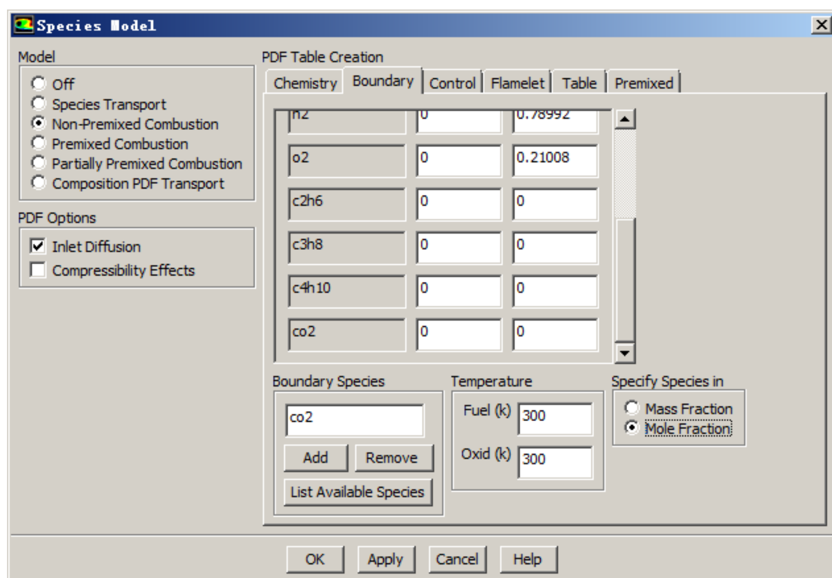


图 6-16 设置氧气浓度

10）依次输入燃油“Fuel”各项的摩尔分数，如表 6-1 所示。

表 6-1 燃油“Fuel”各项的摩尔分数

材料种类	摩尔分数	材料种类	摩尔分数	材料种类	摩尔分数
ch4	0.965	c2h6	0.017	c4h10	0.001
n2	0.013	c3h8	0.001	co2	0.003

11）将“Fuel”和“Oxid”两项温度均设置为“315”，如图 6-17 所示。

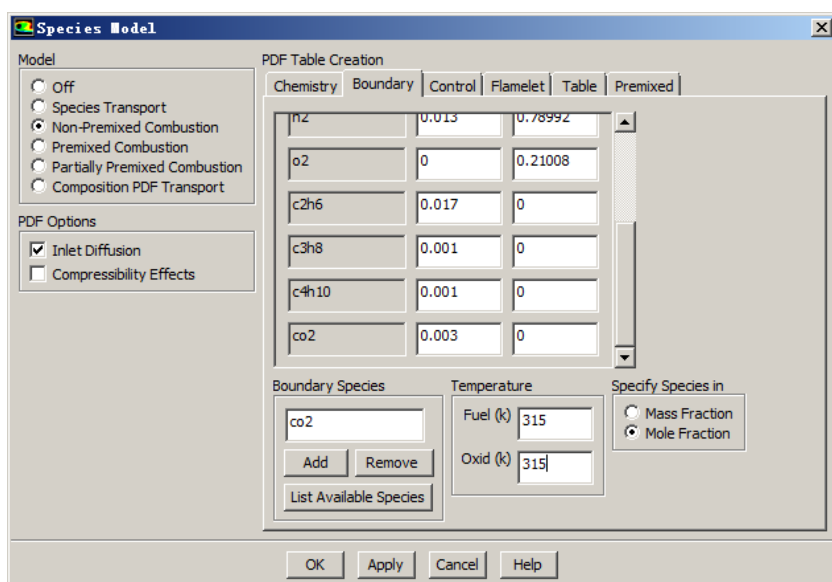


图 6-17 温度设置

12）切换到“Table”页，保持默认设置，单击“Calculate PDF Table”按钮进行非绝热 PDF Table 计算，如图 6-18 所示。

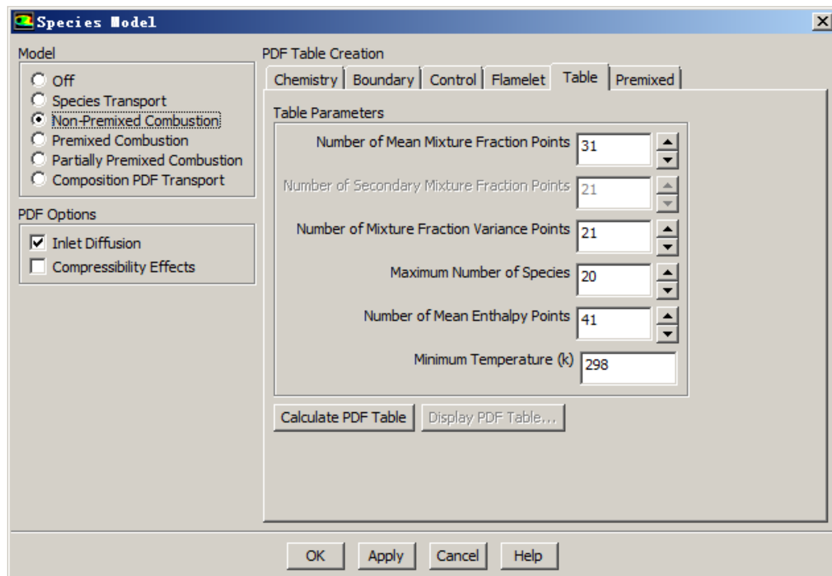


图 6-18　PDF Table 计算

13）计算完成后，“Display PDF Table...”按钮被激活，如图 6-19 所示。

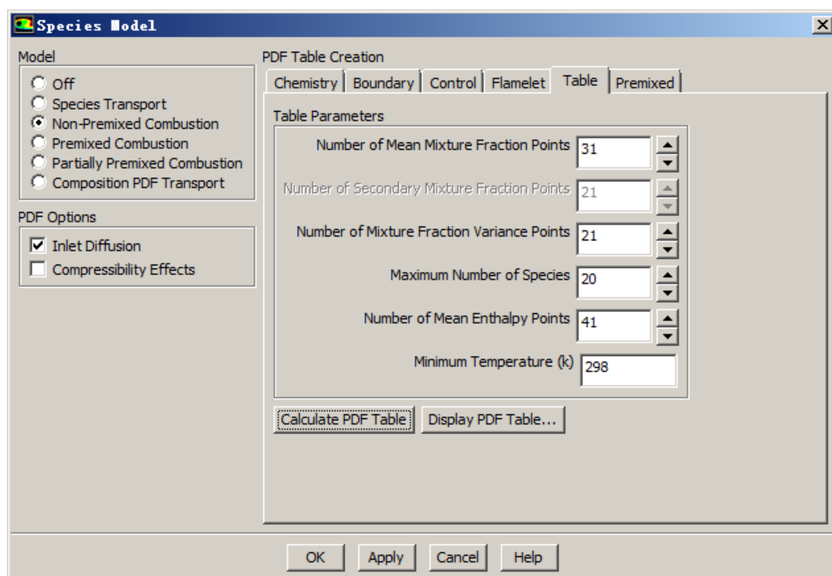


图 6-19　激活“Display PDF Table...”按钮

14）单击“Display PDF Table...”按钮，打开“PDF Table”对话框，如图 6-20 所示。保持默认设置，单击“Display”按钮，视图区显示出图中设置对应截面的温度分布。单击“Close”按钮退出。单击“OK”按钮确认操作。

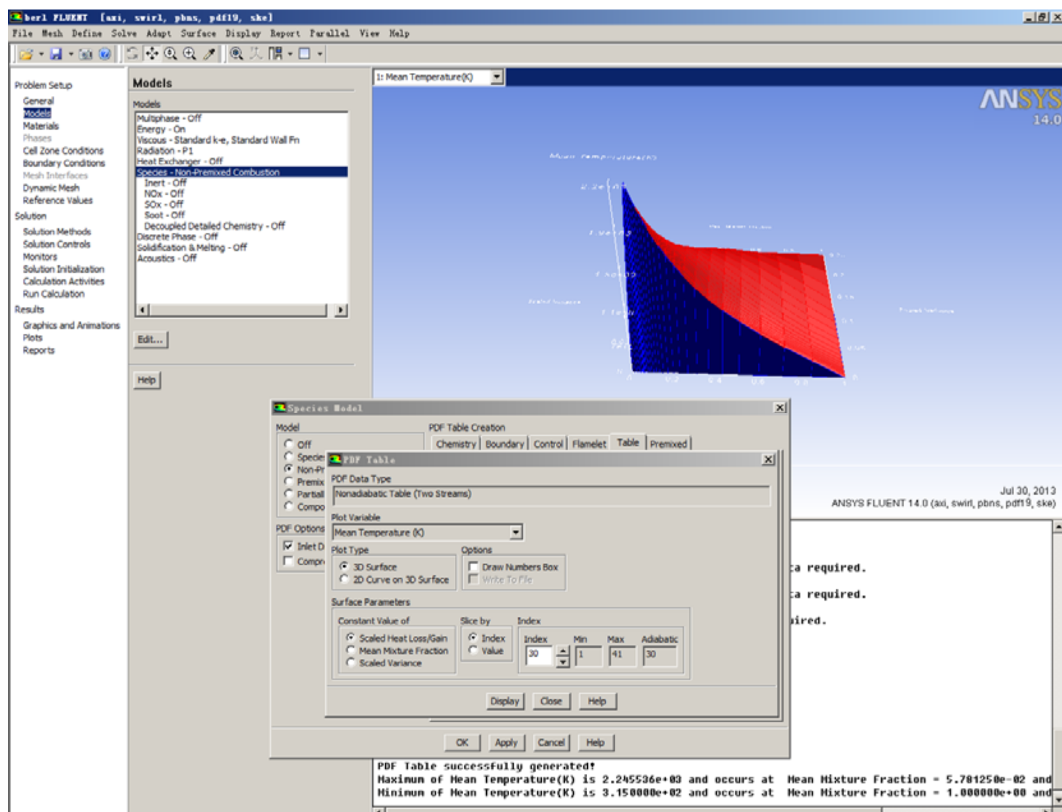


图 6-20 温度分布设置

15）选择菜单项“File”>“Write”>“PDF...”，保存 PDF 文件，如图 6-21 所示。

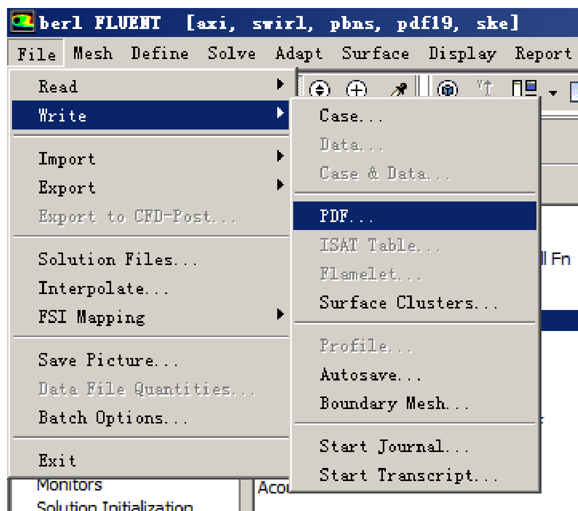


图 6-21 保存 PDF 文件

16）在弹出的对话框中选择默认的文件名，单击“OK”按钮完成保存，如图 6-22 所示。

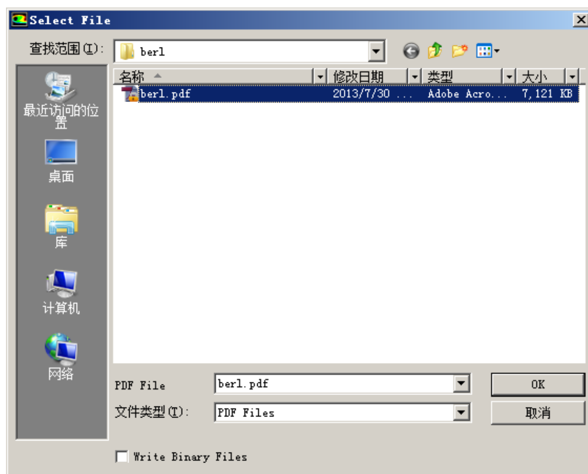


图 6-22　选择默认的文件名

17）单击“OK”按钮，退出“Species Model”对话框。

3．材料属性设置

1）选择树形菜单“Problem Setup” > “Materials” > “pdf-mixture” > “Create/Edit...”，打开“Create/Edit Materials”对话框，如图 6-23 所示。

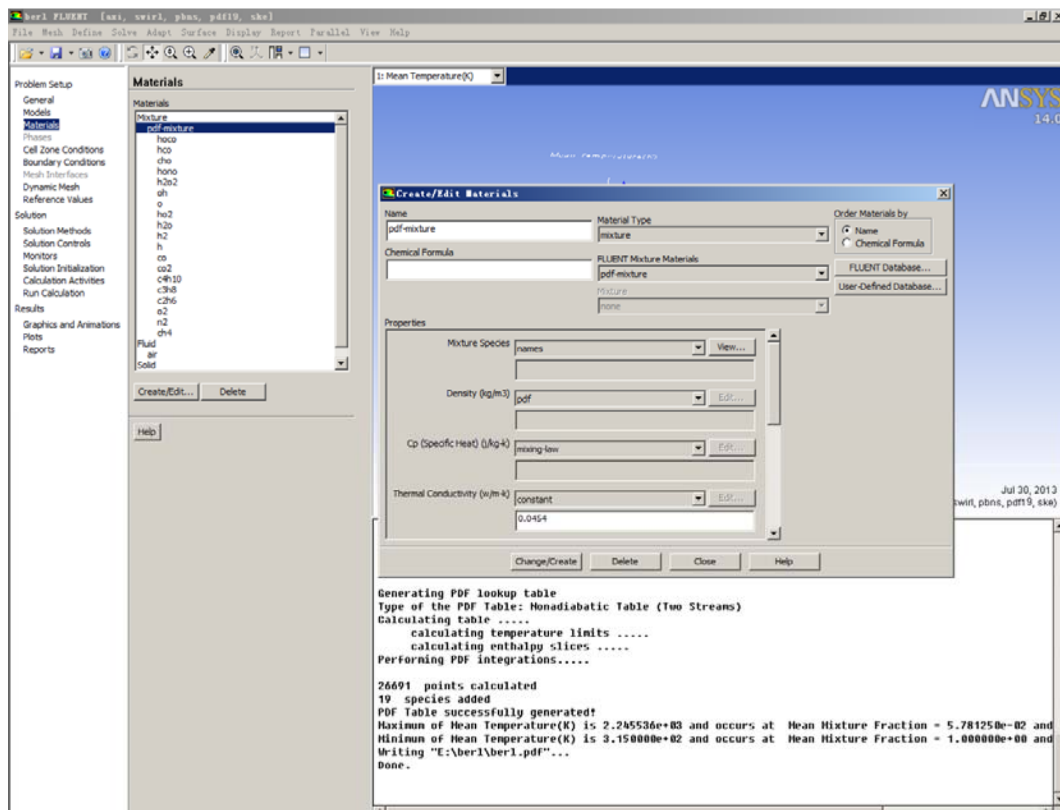


图 6-23　“Create/Edit Materials”对话框

2）在该对话框中可以设置材料的热物性参数。在“Absorption Coefficient”栏中选择“wsggm-domain-based”项，单击“Change/Create”按钮，如图 6-24 所示。单击“Close”按钮退出。

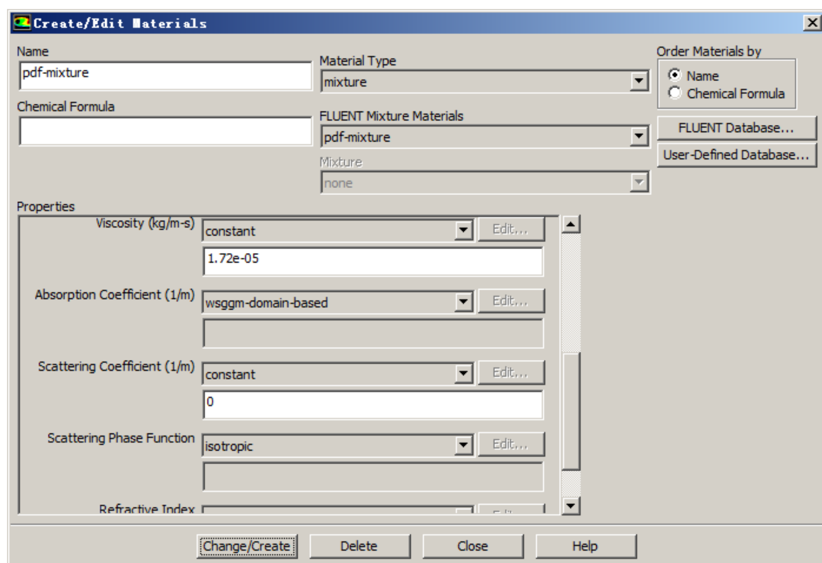


图 6-24　设置“Absorption Coefficient”

4．边界条件设置

1）选择菜单项“File”>“Read”>“Profile...”，选择“berl.prof”，导入数据曲线，如图 6-25 所示。

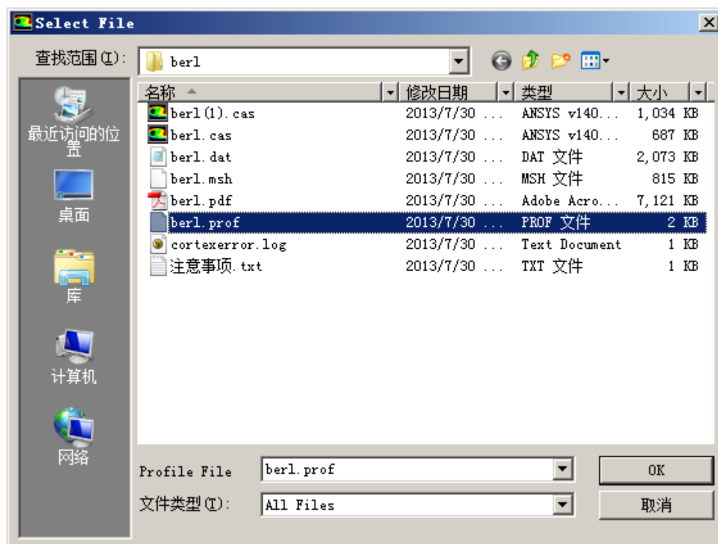


图 6-25　导入数据曲线

2）保持树形菜单“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“poutlet-3”项为

“pressure-outlet”条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“poutlet-3”>“Edit...”，打开“Pressure Outlet”对话框，如图 6-26 所示。

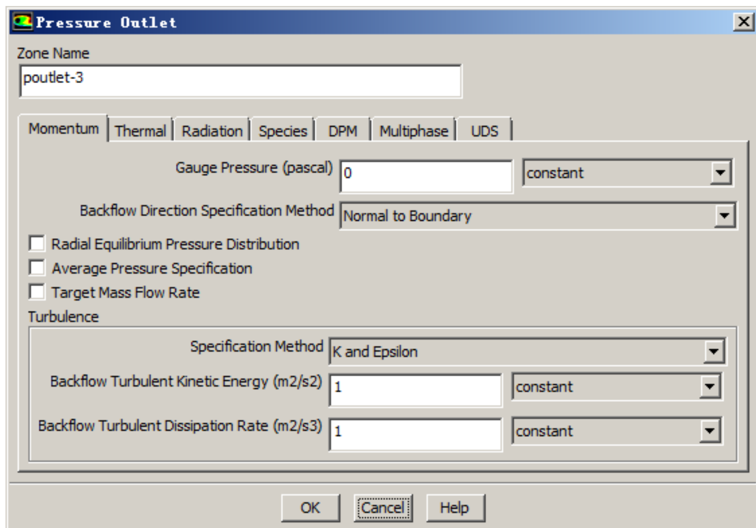


图 6-26 “Pressure Outlet”对话框

3）设置出口回流条件。将“Specification Method”项设置为“Intensity and Hydraulic Diameter”方式，同时将“Backflow Turbulent Intensity（%）”项设置为“5”，将“Backflow Hydraulic Diameter（mm）”项设置为“600”，如图 6-27 所示。

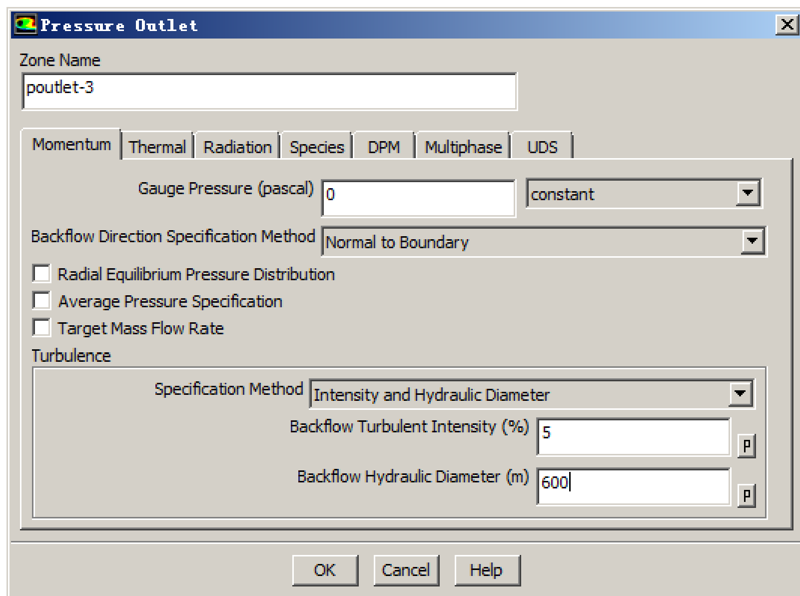


图 6-27 设置出口回流条件

4）设置出口温度条件。切换到“Thermal”页，将“Backflow Total Temperature（K）”项设置为“1310”，如图 6-28 所示。单击“OK”按钮确认操作。

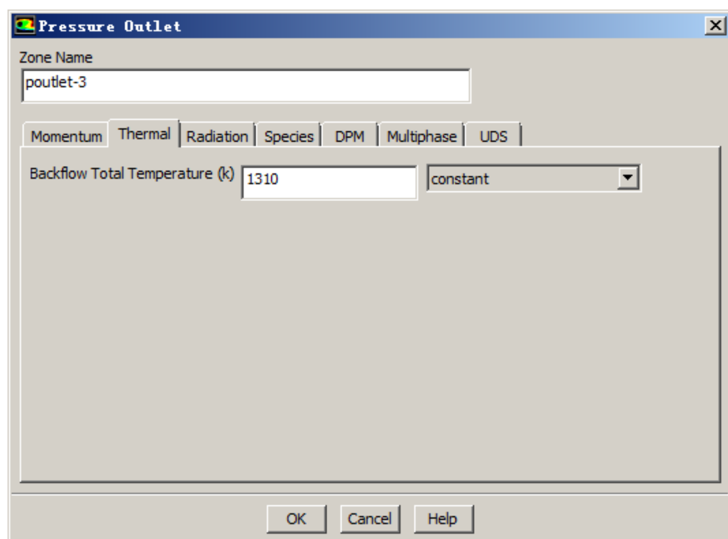


图 6-28 设置出口温度条件

5）保持树形菜单“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“air-inlet-4”项为“velocity-inlet”条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“air -inlet-4”>“Edit...”，打开“Velocity Inlet”对话框，如图 6-29 所示。

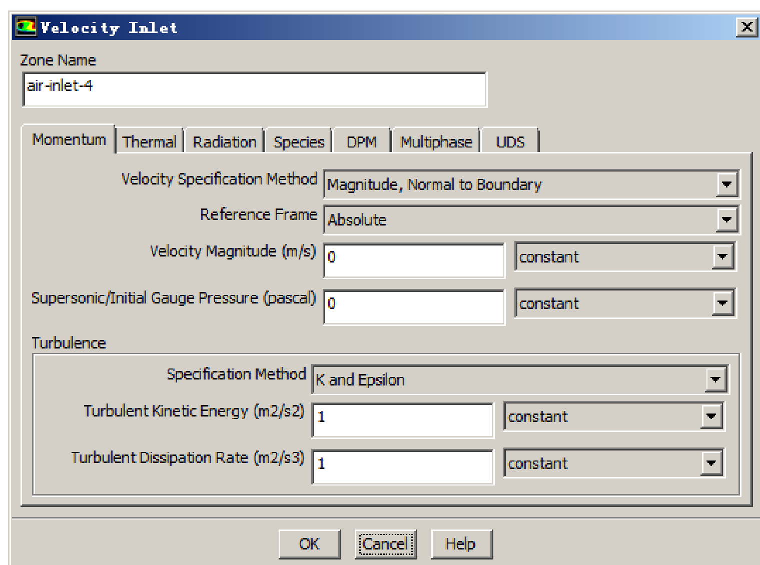


图 6-29 设置 air-inlet-4 入口条件

6）将“Velocity Specification Method”项设置为“Components”，将“Axial-Velocity”项设置为“vel-prof u”，将“Swirl-Velocity”项设置为“vel-prof w”。设置入口湍流条件，将“Specification Method”项设置为“Intensity and Hydraulic Diameter”，同时将“Turbulent Intensity（%）”项设置为“17”，将“Hydraulic Diameter（mm）”项设置为“29”，如图 6-30 所示。

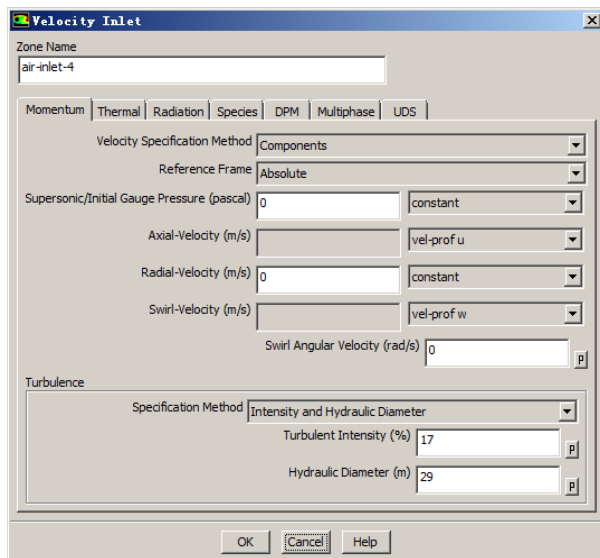


图 6-30　设置 air -inlet-4 入口湍流条件

7）设置入口温度条件。切换到“Thermal”页，将“Temperature（K）”项设置为“322”，如图 6-31 所示。单击“OK”按钮确认操作。

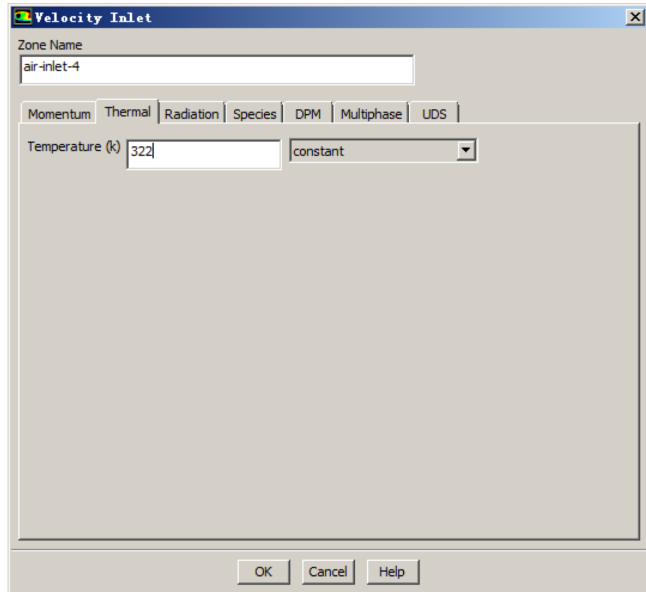


图 6-31　设置 air -inlet-4 入口温度条件

8）保持树形菜单“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“fuel-inlet-5”项为“velocity-inlet”条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“fuel-inlet-5”>“Edit...”，打开“Velocity Inlet”对话框。

9）将“Velocity Specification Method”项设置为“Components”，将“Radial-Velocity（m/s）”项设置为“157.25”，将“Specification Method”项设置为“Intensity and Hydraulic

Diameter”，同时将“Turbulent Intensity（%）”项设置为“5”，将“Hydraulic Diameter（mm）”项设置为“1.8”，如图 6–32 所示。

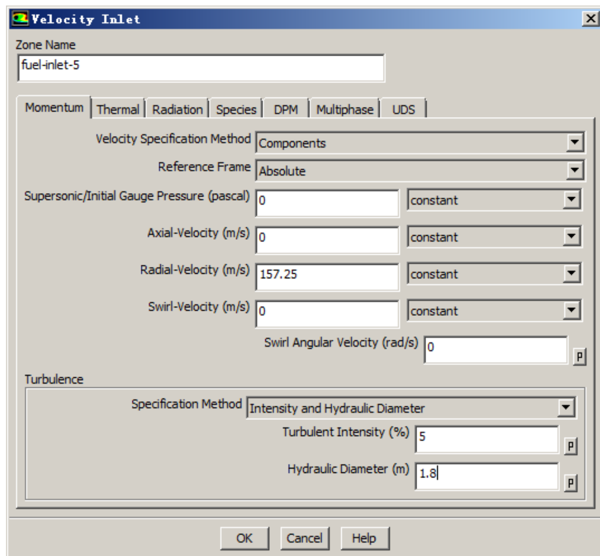


图 6–32　设置 fuel-inlet-5 入口湍流条件

10）切换到“Thermal”页，将“Temperature（K）”项设置为“318”，如图 6–33 所示。

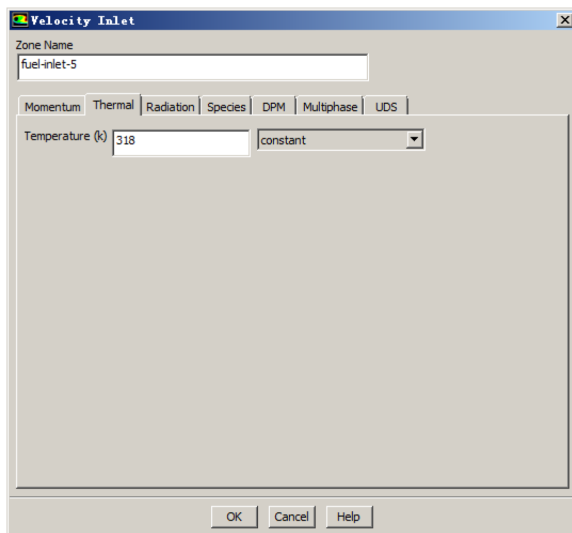


图 6–33　设置 fuel-inlet-5 入口温度条件

11）切换到“Species”页，将“Mean Mixture Fraction”项设置为“1”，如图 6–34 所示。单击“OK”按钮确认操作。

12）保持树形菜单“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“wall-6”项为“wall”条件。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“wall-6”>“Edit...”，打开“Wall”对话框，如图 6–35 所示。

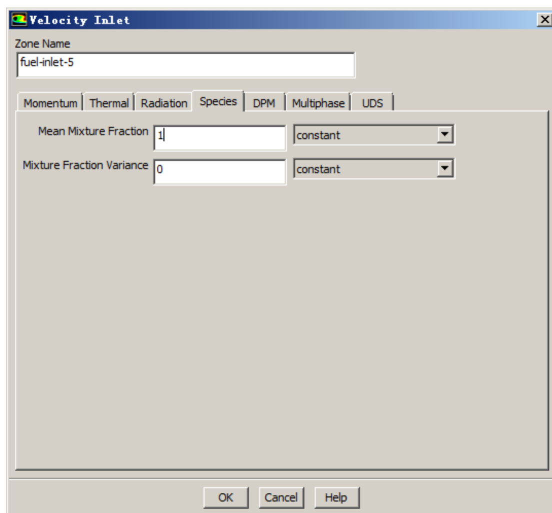


图 6-34　设置“Mean Mixture Fraction”条件

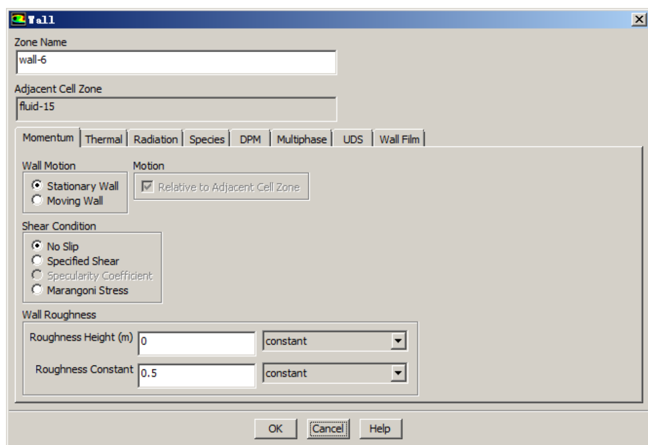


图 6-35　设置 wall-6 壁面条件

13）切换到“Thermal”页，将“Thermal Conditions”项设置为“Temperature”，将“Temperature（K）”项设置为“1375”，将“Internal Emissivity”项设置为“0.55”，如图 6-36 所示。单击“OK”按钮确认操作。

14）重复以上操作，设置其余 Wall 边界，如表 6-2 所示。

表 6-2　设置其余 Wall 边界

边界名 Zone Name	温度 Temperature（K）	内部发射率 Internal Emissivity
wall-7	322	0.55
wall-8	1315	0.55
wall-9	temp-prof t（from the drop-down list）	0.55
wall-10	1115	0.55
wall-11	1275	0.55

（续）

边界名 Zone Name	温度 Temperature（K）	内部发射率 Internal Emissivity
wall-12	1178	0.55
wall-13	1178	0.55

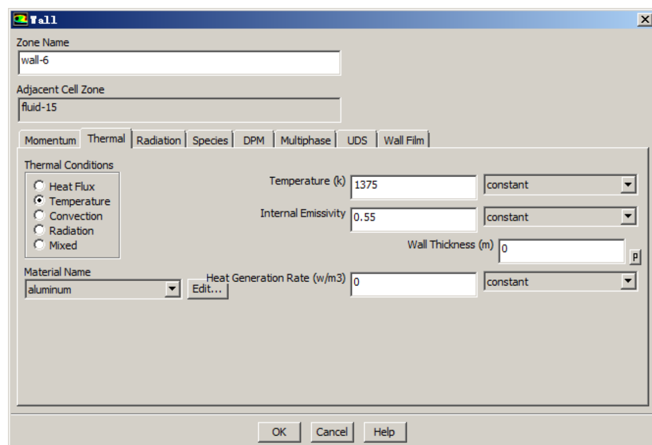


图 6-36　设置 wall-6 壁面温度和发射率

15）选择“Results”>“Plots”>“Profile Data”>“Set Up...”，打开“Plot Profile Data”对话框，如图 6-37 所示。在“Profile”栏中选择“temp-prof”项（对应边界为 wall-9），同时分别保持“Y Axis Function”项为“t”，保持“X Axis Function”项为“x”。

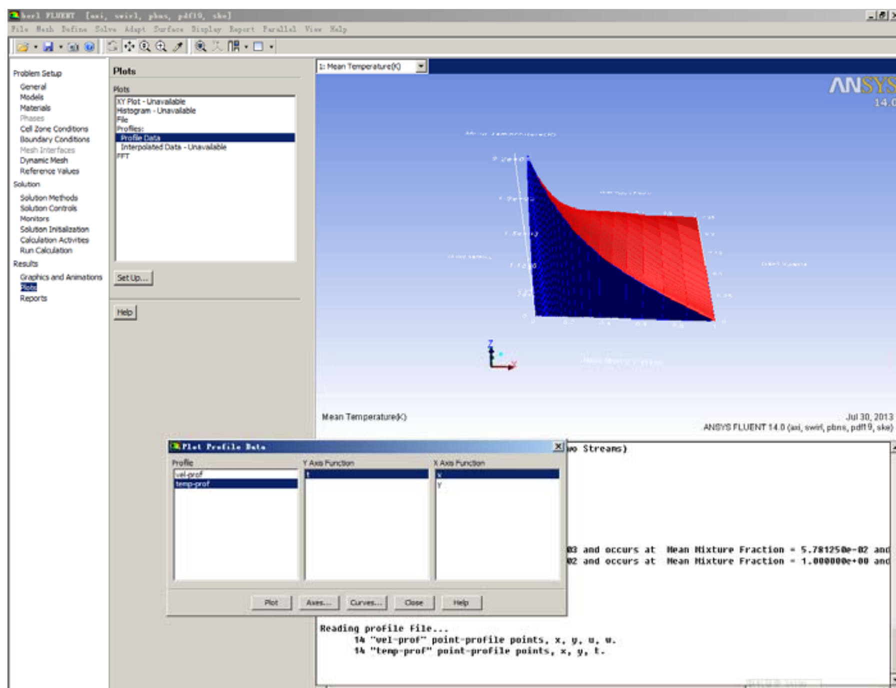


图 6-37　选择“temp-prof”项

16）单击“Plot”按钮，视图区出现相应的曲线，如图 6-38 所示。

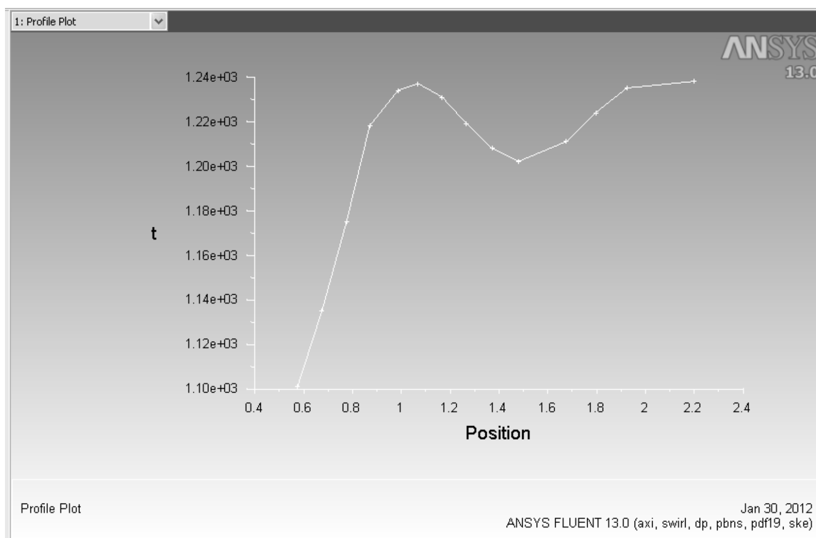


图 6-38　绘制曲线

17）在“Plot Profile Data”对话框的“Profile”栏中选择“vel-prof”项（对应边界为 air-inlet-4），同时分别保持“Y Axis Function”项为“u”，选择“X Axis Function”项为“y”。单击“Plot”按钮，视图区出现相应的曲线，如图 6-39 所示。

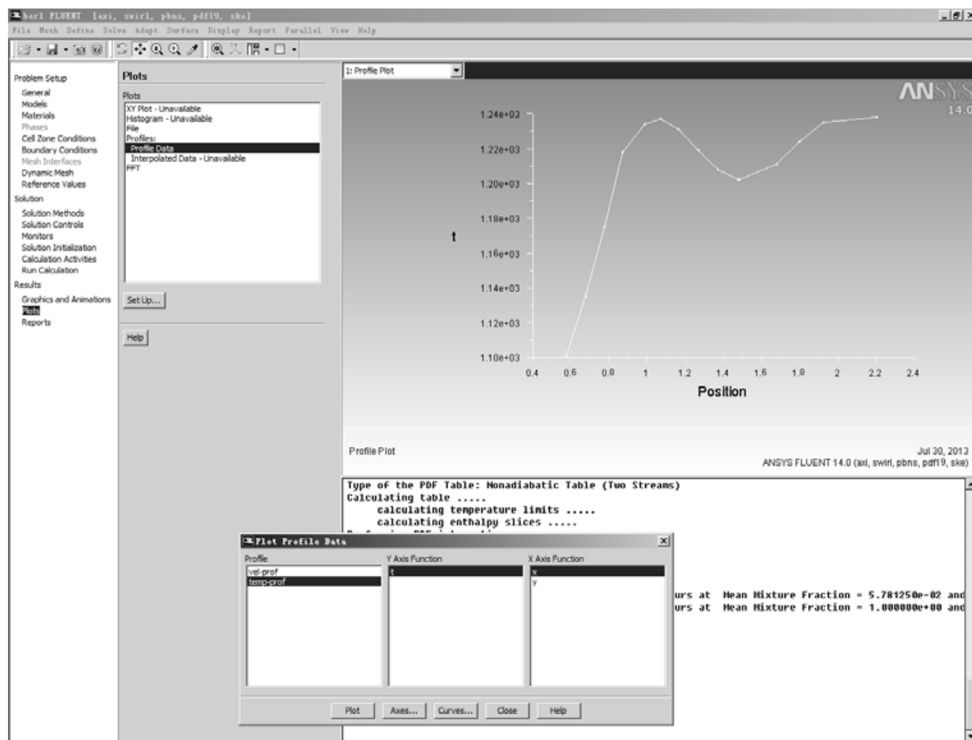


图 6-39　选择“vel-prof”项

18）将上图中的“Y Axis Function”项设置为“w”，将“X Axis Function”项设置为“y”。单击“Plot”按钮，视图区出现相应的曲线，如图 6-40 所示。

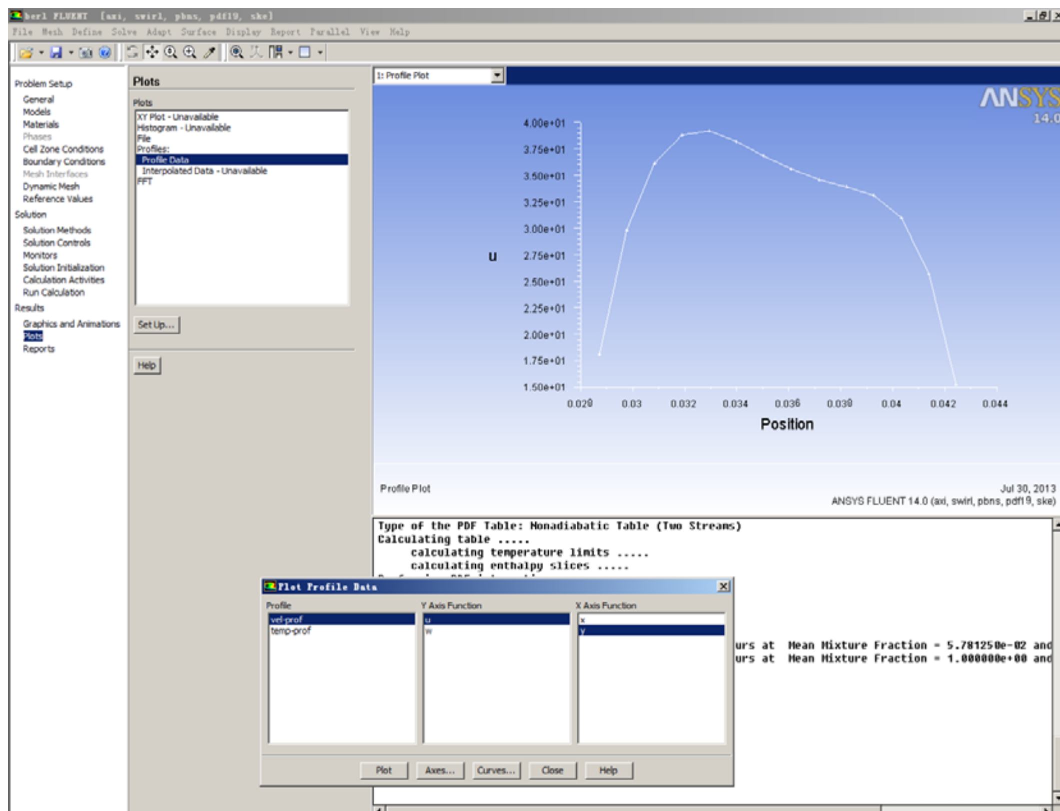


图 6-40　绘制曲线

5．操作工况设置

选择树形菜单“Problem Setup”>“Boundary Conditions”>“Operating Conditions...”项，弹出“Operating Conditions”对话框，如图 6-41 所示。保持默认设置不变。

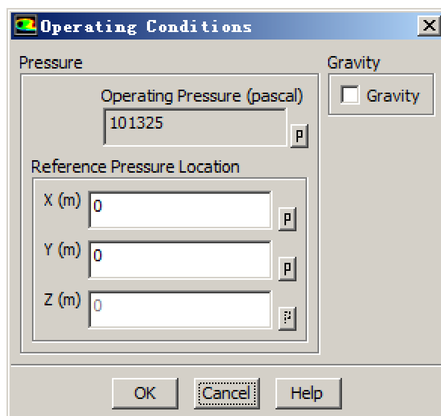


图 6-41　设置操作工况



6.3 模型求解

1）选择树形菜单“Solution”>“Solution Methods”项，其设置如图 6–42 所示。

2）修改模型求解设置，将“Scheme”项设置为“Coupled”方式。

3）在“Spatial Discretization”栏中，保持“Gradient”项不变，将“Pressure”项设置为“PRESTO!”，将除“Mixture Fraction Variance”外的其余项设置为“Second Order Upwind”，如图 6–43 所示。

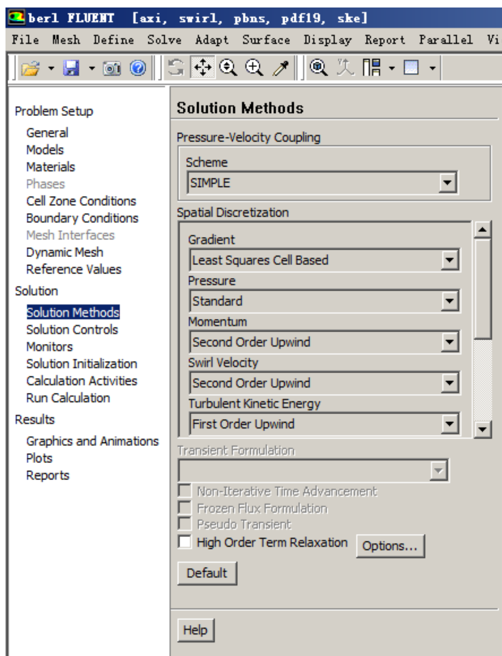


图 6–42　Solution Methods

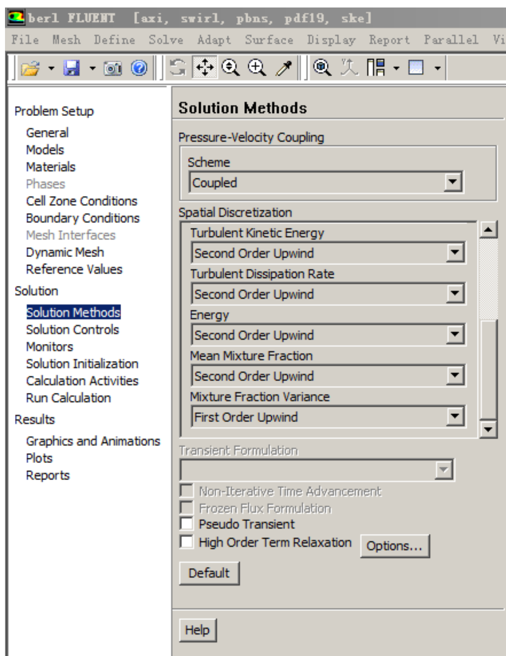


图 6–43　修改模型求解设置

4）选择树形菜单“Solution”>“Solution Controls”项，如图 6–44 所示。

5）“Solution Controls”项的设置如图 6–45 所示，在“Under-Relaxation Factors”栏中，将“Momentum”项设置为“0.3”，将“Pressure”项设置为“0.5”，将“Density”项设置为“0.25”，将“Turbulent Kinetic Energy”项设置为“0.7”，将“Turbulent Dissipation Rate”项设置为“0.7”，其余设值保持不变。

6）选择树形菜单“Solution”>“Monitors”>“Edit...”项，在弹出的“Residual Monitors”对话框中勾选“Plot”项，如图 6–46 所示。单击“OK”按钮退出。

7）选择树形菜单“Solution”>“Solution Initialization”项，在“Initialization Methods”栏中选择“Hybrid Initialization”项，如图 6–47 所示。单击“Initialize”按钮进行初始化。

8）选择菜单项“File”>“Write”>“Case...”，保存本算例，如图 6–48 所示。

9）输入文件名“berl.cas”，单击“OK”按钮保存文件，如图 6–49 所示。

10）选择树形菜单“Solution”>“Run Calculation”项，将“Number of Iterations”项设置为“1500”，如图 6–50 所示。

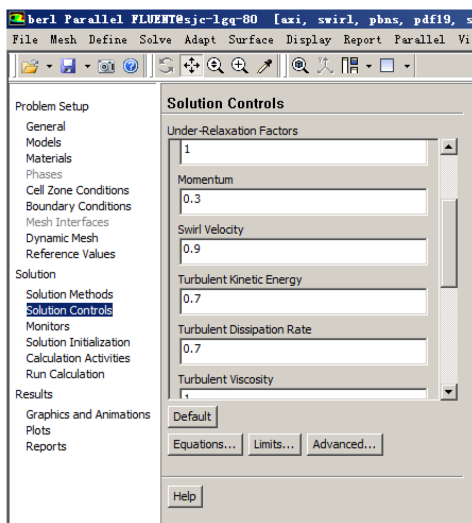


图 6-44 Solution Controls

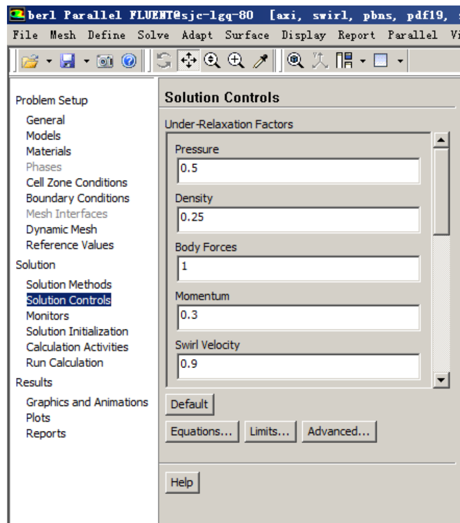


图 6-45 修改 Solution Controls 设置

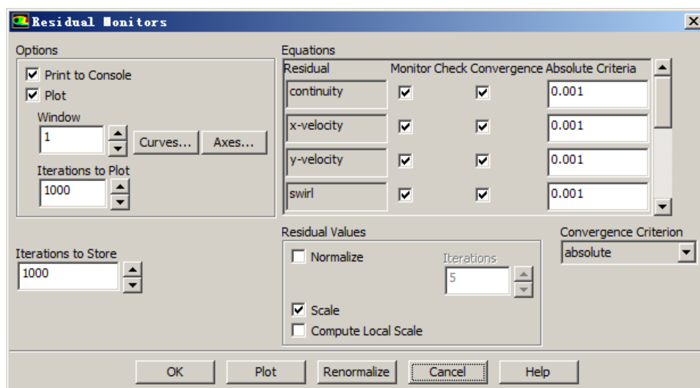


图 6-46 勾选“Plot”项

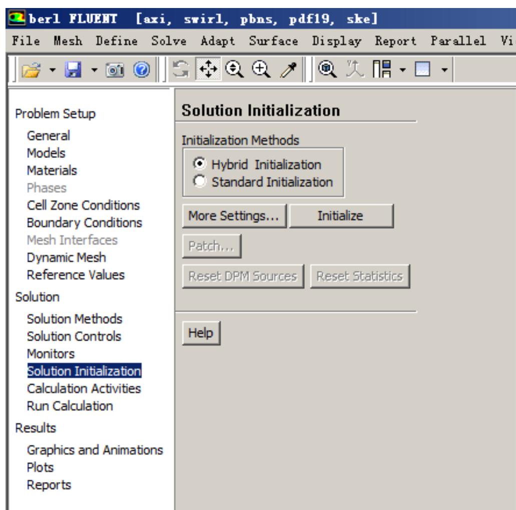


图 6-47 初始化

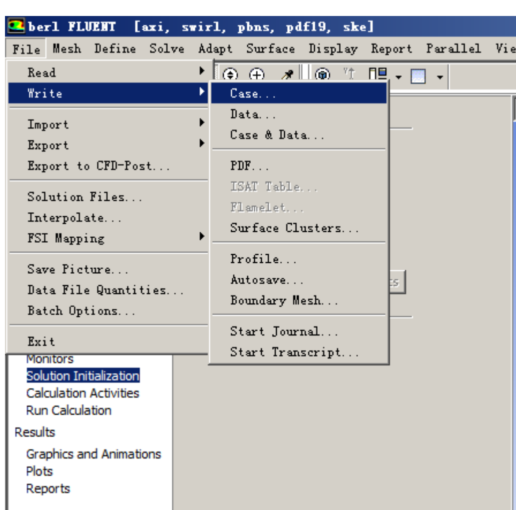


图 6-48 保存本算例



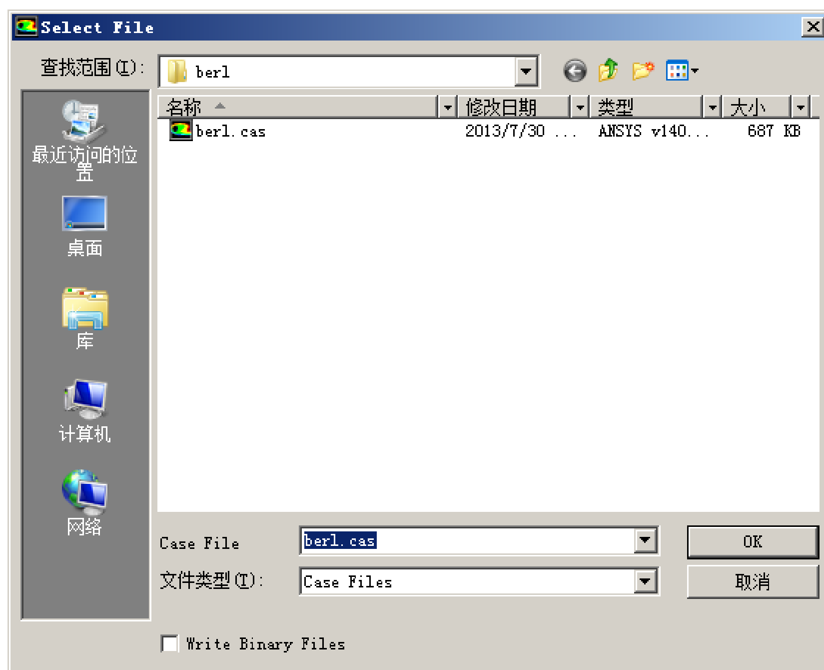


图 6-49　输入文件名“berl.cas”

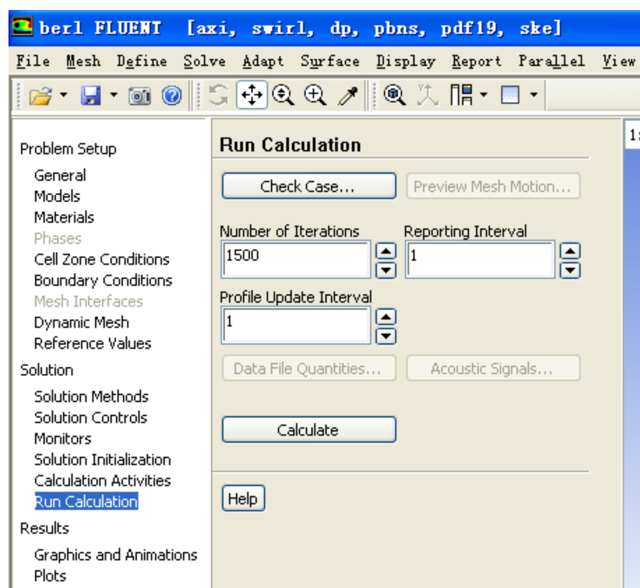


图 6-50　设置迭代步数

11）单击“Calculate”按钮，进行计算。计算过程中的收敛曲线如图 6-51 所示。计算在第 1500 步时收敛，结束计算。

12）选择菜单项“File”>“Write”>“Data...”，输入文件名“berl.dat”，保存本算例的结果文件。

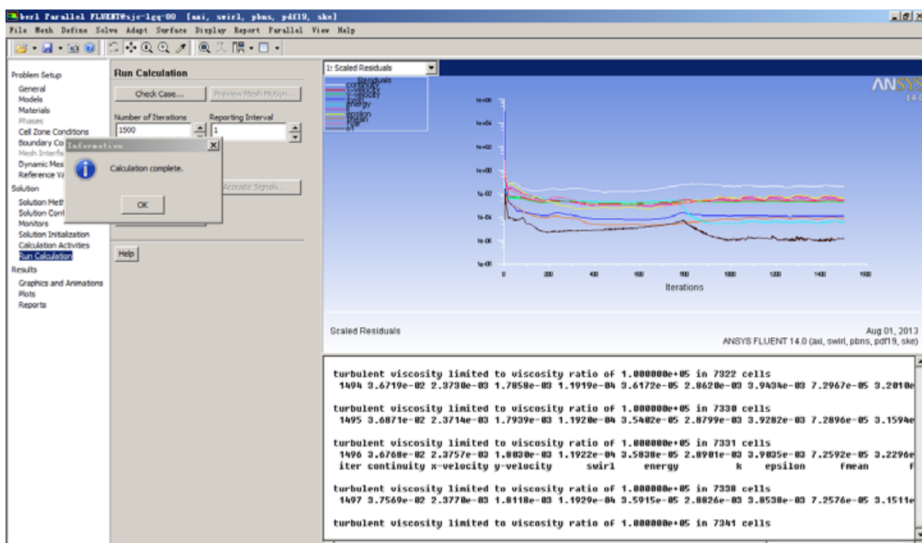


图 6-51　计算过程中的收敛曲线

6.4　计算结果后处理

1）选择树形菜单“Results”>“Graphics and Animations”>“Contours”>“Set Up...”项，弹出“Contours”对话框，勾选“Options”栏中的“Filled”项，在“Contours of”栏中选择“Temperature...”和“Static Temperature”项。

2）单击“Display”按钮，视图区中的温度云图如图 6-52 所示。

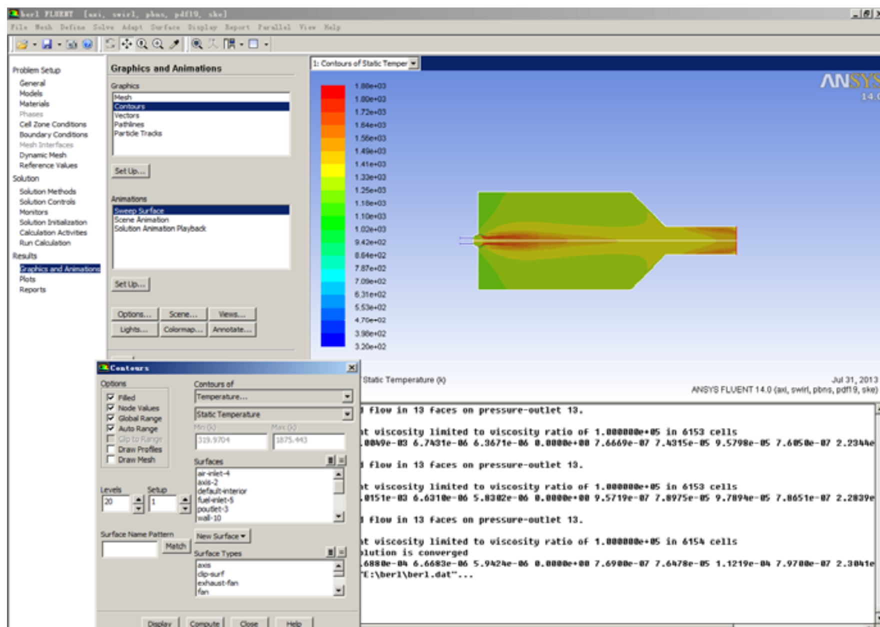


图 6-52　温度云图

3）选择“Contours of”栏中的“Velocity...”和“Velocity Magnitude”项，单击“Display”按钮，视图区中的速度云图如图 6-53 所示。

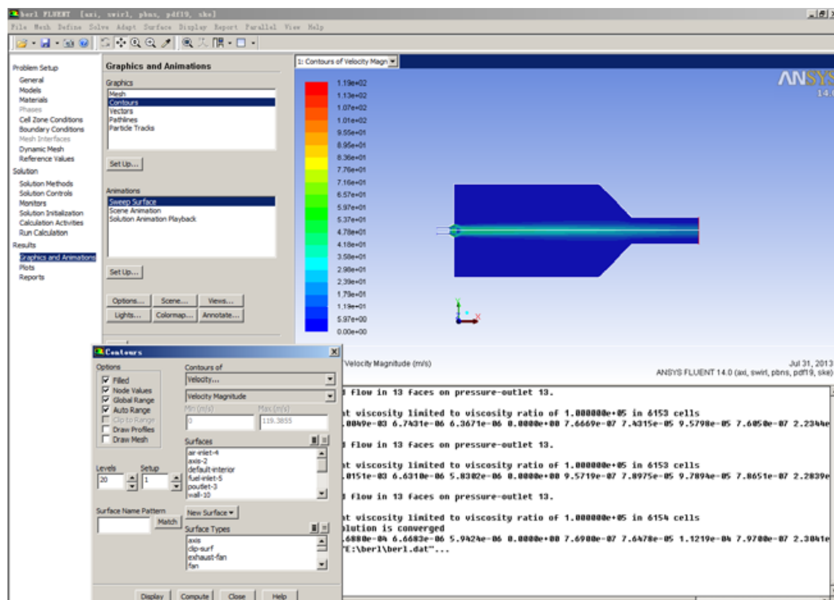


图 6-53　速度云图

4）选择“Contours of”栏中的“Species…”和“Mass fraction of o2”项，单击“Display”按钮，视图区中的 O_2 质量分数云图如图 6-54 所示。

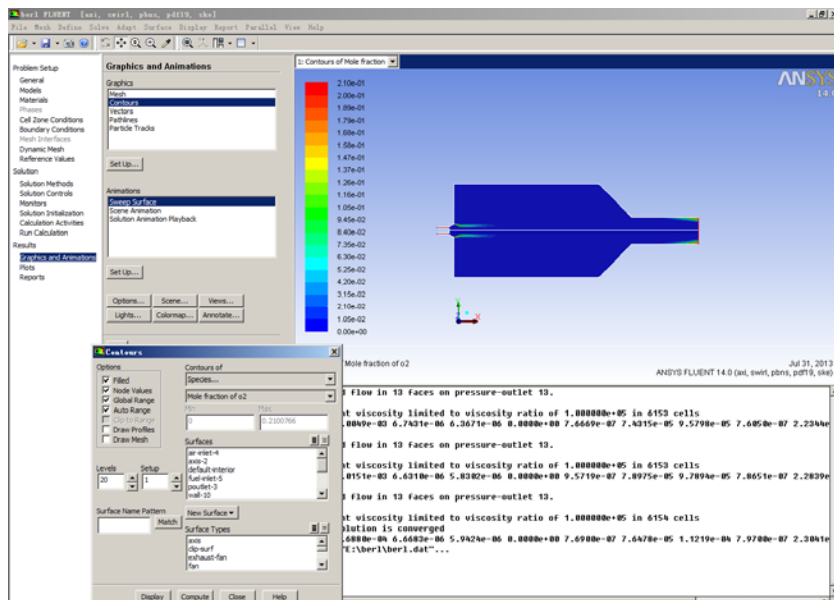


图 6-54　O_2 质量分数云图

5）选择树形菜单“Results”>“Reports”>“Fluxes”>“Set Up...”项，弹出“Flux Reports”对话框。保持选择“Options”栏中的“Mass Flow Rate”项，选择“Boundaries”

栏中的“air-inlet-4”“fuel-inlet-5”和“poutlet-3”三项。单击“Compute”按钮，“Results”栏和右下侧输出栏均显示出对应边界的质量流量，如图 6-55 所示。

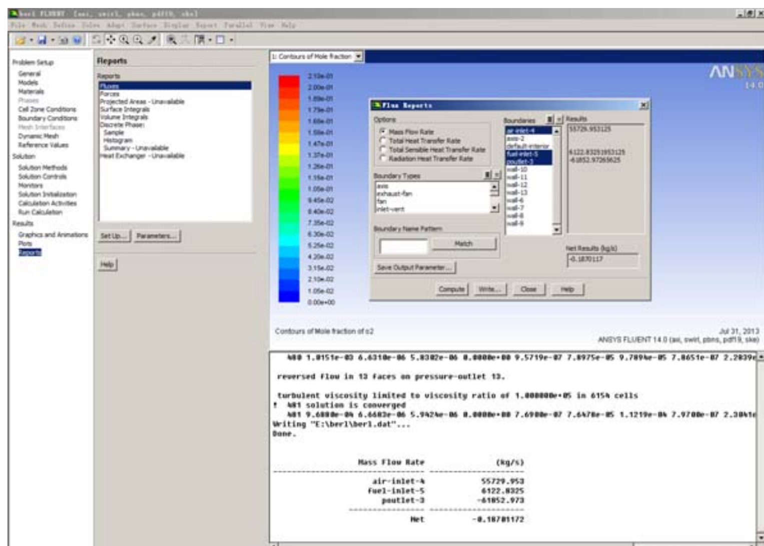


图 6-55　质量流量

6）选择树形菜单“Results”>“Reports”>“Surface Integrals”>“Set Up...”项，弹出“Surface Integrals”对话框。依次选择“Report Type”栏中的“Mass-Weighted Average”项，选择“Field Variable”栏中的“Temperature...”和“Static Temperature”项，选择“Surfaces”栏中的“poutlet-3”项。单击“Compute”按钮，“Mass-Weighted Average（K）”栏显示出对应表面的平均温度，如图 6-56 所示。

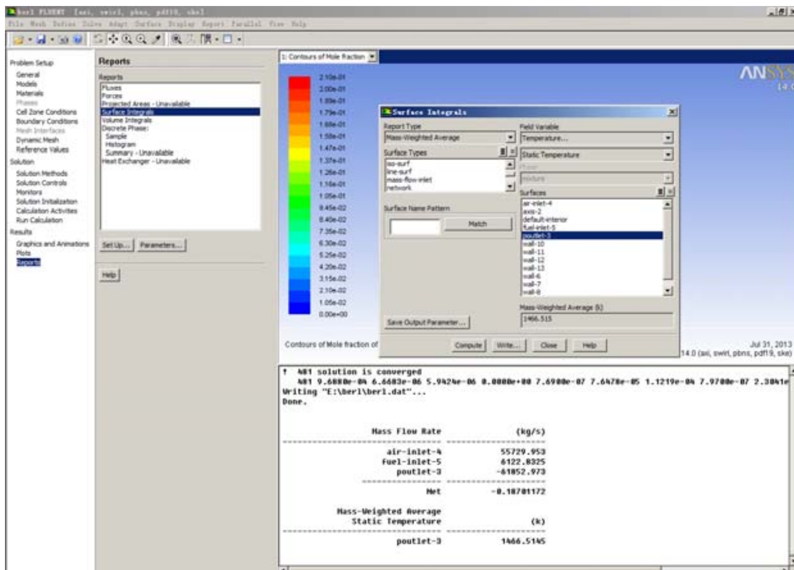


图 6-56　平均温度

注意：本章对应的源文件详见光盘文件夹“berl”。

第 7 章 Isight 多学科优化设计软件介绍

本章主要内容：

本章主要介绍 Isight 多学科优化设计软件的基本功能、各种优化方法以及优化流程的搭建方法。

本章学习目标：

✧ Isight 软件的基本功能。

✧ 试验设计及优化算法。

✧ Isight 软件的基本优化流程搭建的方法。

7.1 Isight 软件功能概述

7.1.1 概述

Isight 软件是一个仿真分析流程自动化和多学科多目标优化工具，它提供了一个可视化的仿真流程搭建平台，同时提供与多种主流 CAE 分析工具的专用接口。Isight 软件提供了试验设计、优化方法、近似模型和六西格玛设计等一套完整的优化软件包，帮助用户深入全面地了解产品的设计空间，明晰设计变量与设计目标之间的关系。Isight 软件将大量需要人工完成的工作由软件实现自动化处理，协助工程设计者进行重复性、易出错的数字和设计处理工作，因此 Isight 又被称为“软件机器人”。

Isight 软件 Design Gateway 模块的界面如图 7-1 所示。

7.1.2 Isight 软件的主要功能

（1）柔性灵活的仿真流程集成

Isight 软件具备广泛的 CAD/CAE 甚至自编程序集成接口，用户可通过拖曳的方式快速建立复杂的仿真分析流程，设定和修改设计变量以及目标，自动进行多次分析循环；通过对模型的封装生成参数化的模板，用户可以对不同模板进行组合。

（2）参数研究和设计优化

提供设计优化所需要的多种算法包，包括试验设计、优化算法、近似模型、蒙特卡洛分析、田口稳健性设计、6 Sigma 质量设计方法等。根据优化问题的特点，用户可以组合多种数学算法，形成综合探索策略。

（3）流程执行自动化和可视化

Isight 软件自动化驱动仿真流程进行多方案比较和优化。目标函数、约束函数和设计变

量值的变化历程以可视化的方式直观显示出来。如果用户发现设计优化过程不正确，则可修改优化模型或选用其他数学算法。

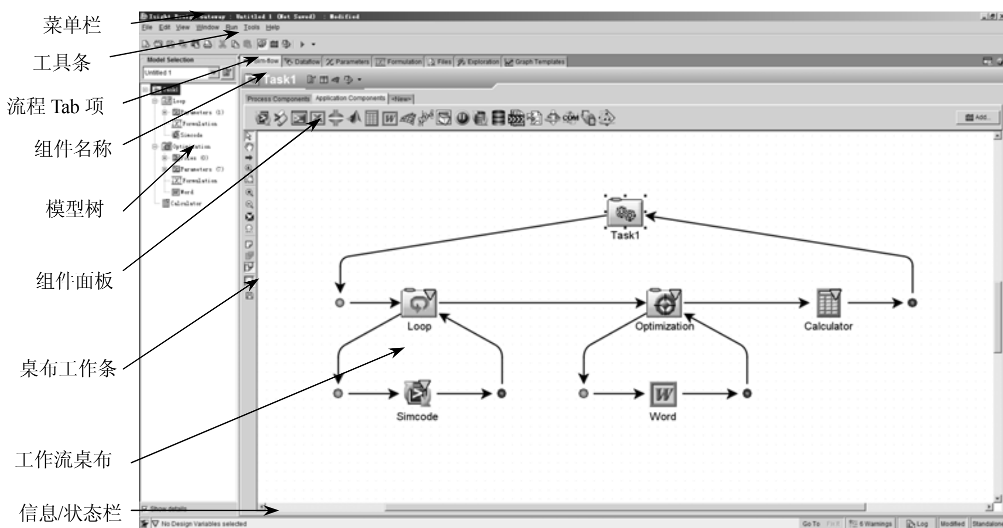


图 7-1 Design Gateway 模块的界面

（4）数据分析和后处理

Isight 软件提供了多种数据分析和后处理工具，当优化完成以后，用户可以进行设计空间浏览、多准则权衡、多方案对比、数据筛选，并自动生成优化分析报告。

（5）开放性和可扩充性

Isight 软件具有良好的开放性，方便用户根据需要进行功能扩充，包括界面定制、算法嵌入等。Isight 软件还可以与 PLM（Product Lifecycle Management）或 SDM（Simulation Data Manager）等数据管理平台进行互换，包括 MatrixOne、Winchill、TeamCenter、Enovia、VPM、SLM、SEE 和 SimManager 等。

7.1.3 Isight 软件的特点

Isight 软件具有“面向对象化集成、高度的易用性、完全的可视化、灵活的可定制性以及与企业服务器的互联性”的特点，是适用于企业环境中使用的功能强大的优化设计平台。

Isight 软件具有如下特点：

- 提供了大量专业化组件，使用户集成商业程序和自编代码极为方便。
- 用户通过组件拖曳的方式集成自己的应用程序和流程，形成仿真流程（Simflow）。
- 通过数据映射构造 Dataflow（数据流），便于组织企业级的复杂设计分析流程。
- 分层式流程管理便于实现多学科设计架构，用户可以在各个层面缩放式地查看任务结点间的数据和流程关系。
- 支持用户发布、存储和共享自己的模型，实现知识重用，提供本地库，可以将用户已有的模型、组件进行存储。
- 提供了专业的确定性和基于统计方法的算法驱动设计流程，改善原设计方案。
- 实现从单目标、单学科到多目标、多学科的优化设计过程。

- Isight 软件提供面向 6σ 的设计（DFSS）是世界质量工程设计中的标准性设计方法，目前是该层面应用软件中的唯一代表。
- 提供高级可视化功能便于用户进行数据挖掘和规律归纳。
- 具备高度的可扩展性和定制性，用户可以通过通用的 Java 接口，嵌入自己的算法或组件，定制可视化界面，同时 Isight 软件通过 XML 格式可以被其他系统集成与封装。
- Isight 软件可以扩展到企业级的 Fiper 平台，实现企业级多用户的模型共享和访问控制以及 B2B 访问和控制。
- Isight 软件可以通过 Fiper 接口调度 LSF/Fiper Stations 等网格计算资源，实现分步并行计算服务。

7.1.4 模块构成

（1）设计门户（Design Gateway）

流程集成界面，通过搭积木的方式实现流程集成，将数据流和控制流可视化，并提供对整个流程进行浏览的界面。设计流程按树状结构定义，每个层次的子任务可以使用不同的设计探索策略。

（2）运用门户（Runtime Gateway）

监控和后处理界面，可以绘制多种曲线、曲面、散点图、柱状图和表格等，结果运行完成后生成 Summary 报告给出优化运行时间、最优结果及设计变量、约束等用户关心的问题，提供设计空间可视化（VDD）、工程数据挖掘（EDM）等后处理功能。

（3）组件库（Library/Add-On Component）

包含通用和专用的 CAD/CAE 及自编软件接口。

（4）优化算法库（Optimization）

包含梯度优化、全局优化、多目标优化和专家智能优化算法，是工程师展开设计优化工作的利器。

（5）试验设计计算法库（DOE，Design Of Experiments）

通过系统而有效的方法分析设计空间、筛选关键设计参数（减少问题规模）、评估设计变量影响以及辨别设计变量的交互影响关系。

（6）近似模型算法库（Approximation）

对于计算代价高昂的 CAE 分析，Isight 软件用多种近似原理构造替代模型，减少优化中调用 CAE 分析计算的次数，提高优化效率。近似模型还用于剔除输入参数平缓变化而输出参数剧烈振荡的仿真噪声。

（7）质量设计优化（Quality Design）

运用随机仿真和优化理论（包括蒙特卡洛仿真，Taguchi 田口稳健性设计，以及基于 6 Sigma 可靠性分析和稳健分析设计 DFSS，即 Design For Six Sigma），构成一个对可靠性和稳健性进行评价和改进，较为完整的、公式化的质量设计哲学框架。

7.1.5 组件库及组件接口

Isight 组件是一系列模型（Model），工具（Tools）、算法（Drivers）、过程（Workflow）

在 Isight 软件环境中的封装。每个插件通过一个封装器（Wrapper）或适配器（Adapter）使底层的工具和模型可以与 Isight 软件进行通信。同时，Isight 组件还提供了包括 Abaqus、Nastran、FLUENT 等 CAE 工具，CATIA、UG、Creo 等 CAD 工具，以及 MATLAB、Excel、Word、数据库文件交互等众多工程分析中经常使用的相关工具。

Isight 中的组件分为基本组件（Design Gateway 模块包含）和专用组件接口（可选模块）两大类。

（1）基本组件接口

Gateway 模块基本组件接口如表 7-1 所示。

表 7-1　Gateway 模块基本组件接口

组　件	描　述
	Abaqus Abaqus 接口，与 Abaqus Solvers 或 Abaqus/CAE 交换数据
	Calculator 进行基本的数学运算，包含大量数学函数与数组操作函数
	COM 与微软 COM 对象集成
	Data Exchanger 解析文本文件，从文本文件读/写数据
	Database 数据库接口，与数据库交换数据
	Excel Excel 接口，与微软 Excel 交换数据
	Loop 基于指定的 while，do until，for，or for each 规则对仿真工作流进行循环
	Mail 将指定内容与参数发送 e-mail 到指定信箱
	MATLAB MATLAB 接口，与 MATLAB 文件交换数据
	Noise Analysis 通过对输入参数扫描计算输出参数的噪音水平
	OSCommand 执行一个操作系统的命令或程序
	Pause 暂停工作流，允许修改参数或回答提出的问题
	Script 执行用户指定的 Java Script 脚本
	Simcode 功能强大的通用程序接口，集成由输入/输出文件交换数据的程序

（续）

组　件	描　述
	Task 执行工作流或定义算法组合 Task Plan
	Word Word 接口，可根据模板自动生成报告

1）Calculator 计算组件。Calculator 组件提供了用户输入解析表达式的窗口界面，并支持大量的数学函数和运算符。在 Design Gateway 界面中选择“File”>“New”命令，可创建一个空任务。Calculator 组件工作流程图如图 7-2 所示。

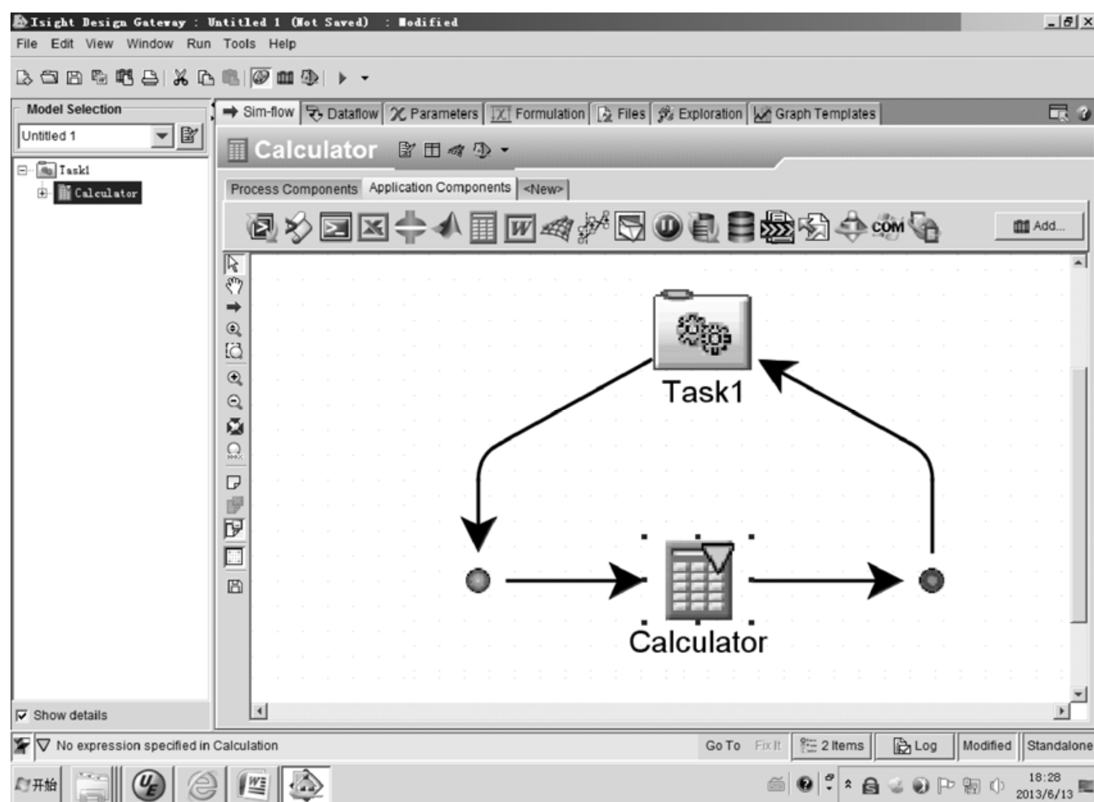


图 7-2　创建 Calculator 工作流

双击计算组件，可在打开的编辑界面中进行如下操作：

- Declared Parameters 列表框：显示所有已经定义了的参数。
- Calculator 按钮：可以计算当前各输出变量的值。
- Available Functions 列表：显示所有可以用于定义公式的数学运算符和操作。
- Status bar：显示当前组件的状态。

计算公式中的变量呈现不同的颜色，方便用户检查：

- 红色：表明数字常量或字符串常量。
- 蓝色：表明参数名。

- 蓝色同时显示下画线：表明未定义参数名，在单击“Calculate”或“OK”按钮时自动进行参数定义。
- 绿色：表明注释。
- 背景色为红：表明存在错误。

2）Data Exchanger 文本读/写组件。Isight 软件提供与文本文件的读/写接口。通常 Data Exchanger 组件可以用来生成应用程序的 Input 输入文件，也可以用于读取应用程序生成的 Output 输出文件。Data Exchanger 组件提供了丰富的操作命令，可准确读/写文本文件中对应位置的字符串值。

Data Exchanger 组件的自编辑界面由命令列表（Action List）、数据区（Data Source Area）、参数列表（Parameter Table）、参数读/写操作区（Parameter Read/Write Area）、参数定位区（Swipe Detail Area）和状态条（Status Bar）等组成，如图 7-3 所示。



图 7-3　Data Exchanger 自编辑界面

3）OS Command 命令行组件。用户可以用 OS Command 组件启动外部的程序，执行各种操作系统的 Shell 脚本。OS Command 组件可以与 Data Exchanger 组件结合，实现对应用程序的集成。

4）Simcode 程序集成组件。Simcode 是一个完整地将应用程序输入、执行、输出进行集成的接口。它本质上包含三个部分：

- 用于改写程序输入文件的 Data Exchanger。
- 执行应用程序的 OS Command。
- 用于读取程序输出文件的 Data Exchanger。

5）Script 脚本组件。Isight 软件提供了 Java 和 Jython 脚本的嵌入口，可用于操作文件系

统、制定复杂的逻辑和数据处理等。

（2）可选模块组件接口

可选模块组件可以更加迅速方便地无缝集成客户的分析模型，而大幅提高效率。部分可选模块组件接口的详细说明如表 7-2 所示。

表 7-2　可选模块组件接口表

	名称/描述
	STAR-CCM+ 通过对.sim 文件进行操作，可以进行相关输入输出文件的修改，工作运行中，组件之间更新.sim 文件，生成宏命令自动运行 STAR-CCM，解析相关的结果
	Data Matching 可视化和对比仿真曲线与已知曲线（如实验曲线）
	ANSYS 允许用户直接修改 ANSYS 输入文件，提交 ANSYS 工作以及结果解析，同时组件还支持各种 ANSYS 输入命令
	PAM CRASH 同 Pam-Crash 之间进行数据交互，允许用户修改 PAM-CRASH .PC 文件，执行工作任务，进行结果解析
	NX Nastran NX Nastran 接口，与 NXNastran bdf 文件与 f06，punch 文件进行交互数据
	MSC Nastran MSC Nastran 接口，与 MSC Nastran bdf 文件与 f06，punch 文件进行交互数据
	Creo 同 Creo 之间直接建立本地关联，允许用户修改 CAD 模型，提取相关的输出参数，无需打开用户界面即可输出几何结果，支持 prt 以及 asm 格式文件，允许输入参数包括二维草图，特征定义以及 GD&T 参数
	CATIA CATIA V5 接口组件，可以直接提取 CATIA 零部件，装配件的特征及参数并驱动修改模型；可直接提取 CATIA Analysis 计算结果
	MSC ADAMS 支持获取所有的 ADAMS/VIEW 的设计变量，以及目标输出等参数。组件接口提供了二次开发界面允许用户可以直接在 ADAMS/VIEW 的界面里进行选取这些参数
	ANSYS WorkBench 与 ANSYS WorkBench 交换 FEA 数据，执行 ANSYS 求解器
	LS DYNA 与 LSDYNA 交换数据，并执行 LS DYNA
	MSC Patran 可以从 Patran 数据库（*.db）中提取变量。支持直接输入和 Patran 界面下图形选择 FEA 参数，像单元厚度、截面尺寸、材料属性、荷载大小、节点坐标等。同时支持从 Nastran op2，xdb 文件提取数据，获取位移、应力、质量属性以及模态等

7.2　安装步骤

以 Isight5.5 软件为例，进行安装流程说明。

1）插入安装光盘，如果安装界面上不自动弹出，可双击“setup.exe”文件，就会弹出 Isight 软件语言选择界面。如图 7-4 所示，可供选择的有“日文”和“中文”，系统默认为“英文”。

2）单击“OK”按钮，弹出 Isight 软件安装欢迎界面，如图 7-5 所示。



图 7-4 软件选择语言界面

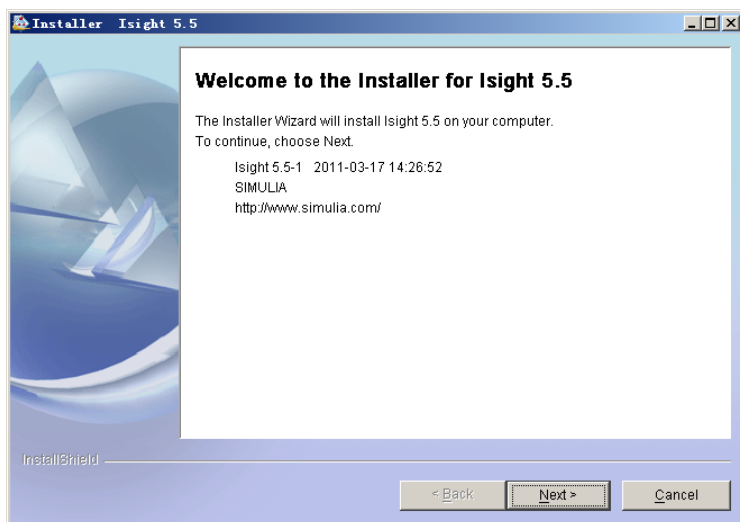


图 7-5 软件安装欢迎界面

3）单击“Next”按钮，弹出阅读合法协议界面，如图 7-6 所示。

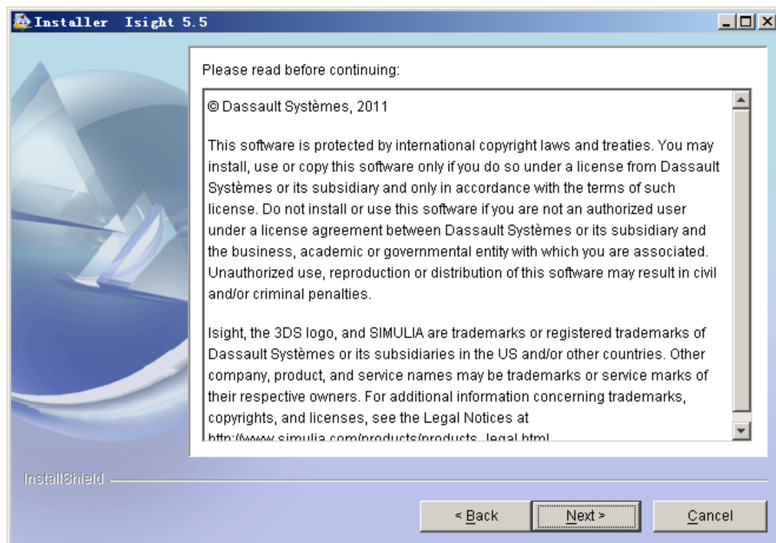


图 7-6 协议合法界面

4）单击“Next”按钮，在弹出的界面中指定 Isight 软件的安装路径，需要执行以下操作：可采用默认的设置，单击“Next”按钮安装在默认路径下；也可以通过单击“Browse”按钮，把 Isight 软件安装在指定的路径下，如图 7-7 所示。

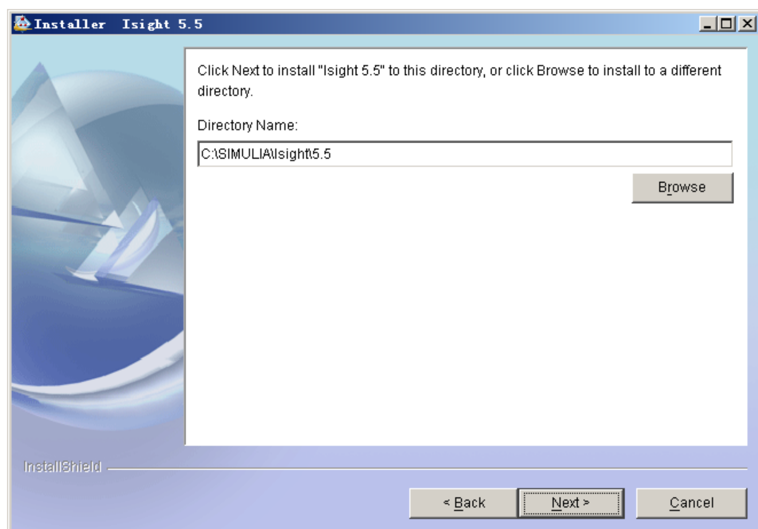


图 7-7 安装路径选择

5）单击“Next”按钮，弹出系统选择界面，分别是 32 位系统和 64 位系统，根据本地电脑的系统情况进行选择，如图 7-8 所示。

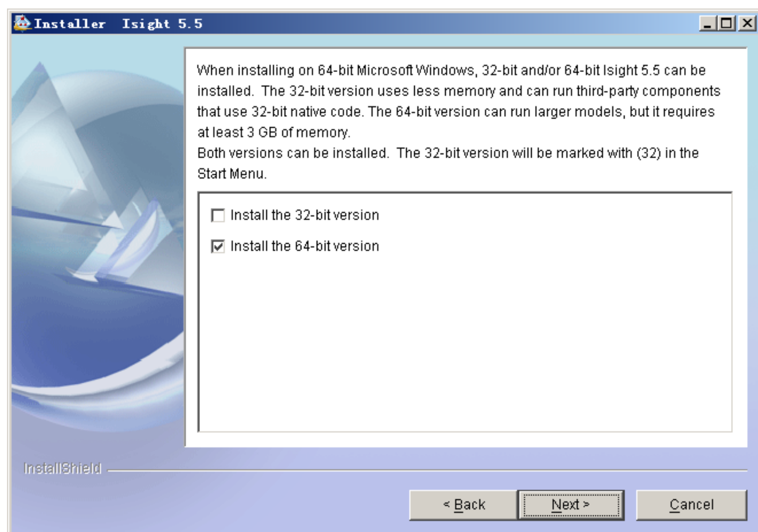


图 7-8 系统选择界面

6）单击“Next”按钮，弹出 license 文件指定界面，共以下 3 个选项，如图 7-9 所示。

① I have a license file：若选择该选项，则会直接定位用户的 license 文件，而不必通过 license 服务器。

② Reference a license server：如果想浮动到某个机器的 license 上，就可以直接选择该项。

③ Skip the license for now - it will be supplied later：若选择该项，则用户在得到自己的 license 后，就必须手动配置和启动自身的 license sever。

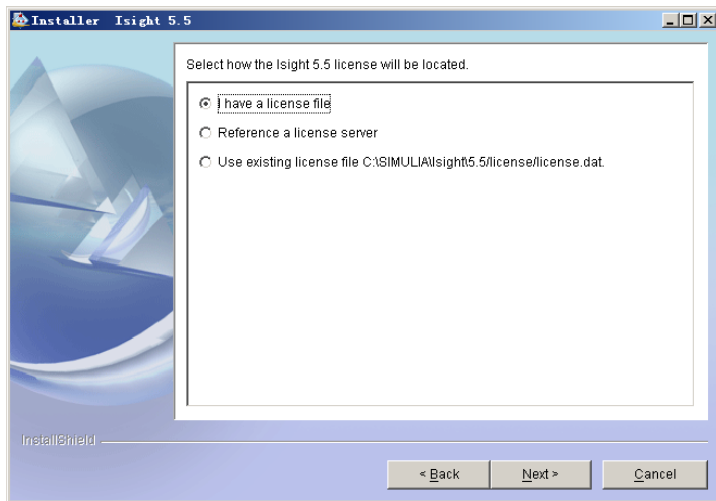


图 7-9 license 文件指定安装方式

7）单击“Next”按钮，那么根据上步的选择不同，分别执行下面的操作。

① 如果选择的是“I have a license file”选项，则用户只需要在路径文本框中输入 license 文件的路径和名字或通过“Browser”按钮直接定位到用户的 license 文件上，如图 7-10 所示。

② 如果选择的是“Reference a license server”选项，则需要输入以下关于 license 服务器的信息。

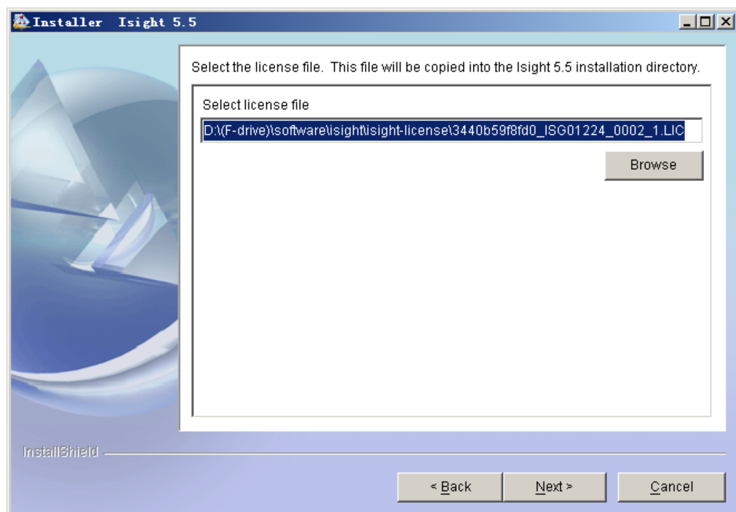


图 7-10 选择 license 文件按照路径

- license Server Name：需要输入运行 license 服务的计算机主机名。
- License Server Port：端口号可以在 license 文件里面找到，这里默认为空。

8）单击“Next”按钮，弹出 license server 的相关信息的界面，如图 7-11 所示。

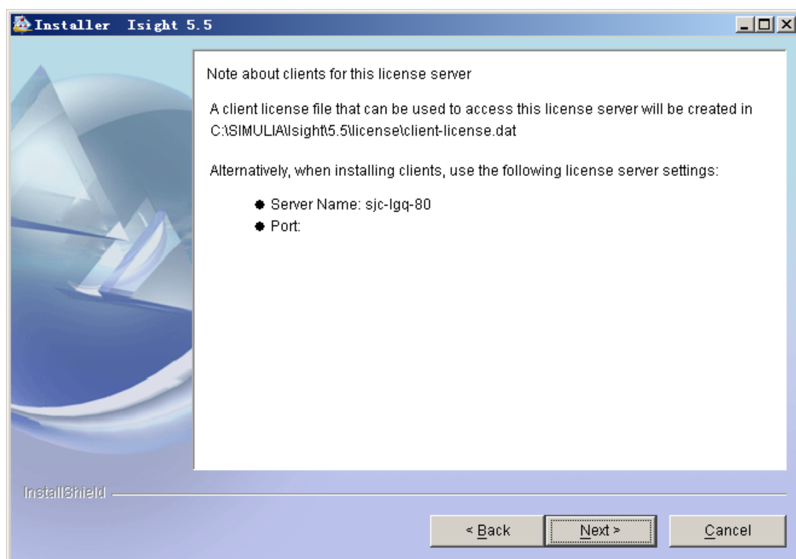


图 7-11　license server 信息

9）单击“Next”按钮，弹出关于软件安装需要的磁盘空间信息的界面，如图 7-12 所示。

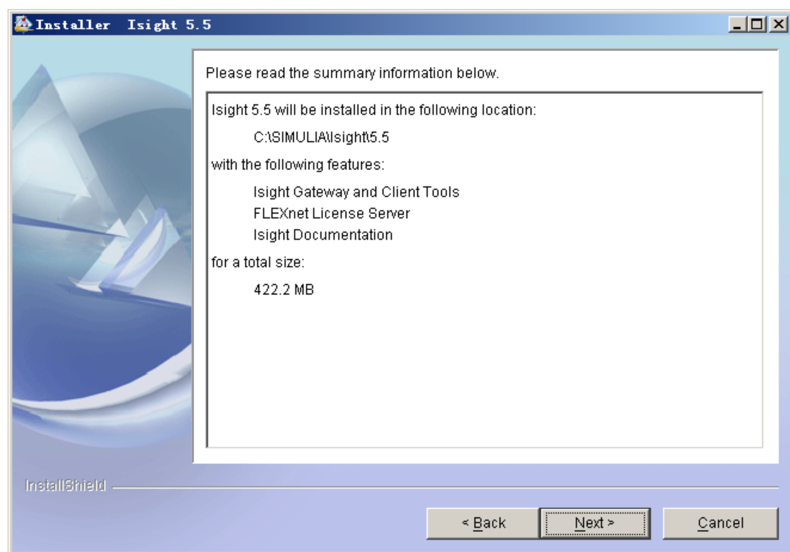


图 7-12　安装空间信息

10）单击“Next”按钮，开始安装 Isight 软件，如图 7-13 所示。

11）安装完成后，单击“Next”按钮，安装完成的界面如图 7-14 所示。

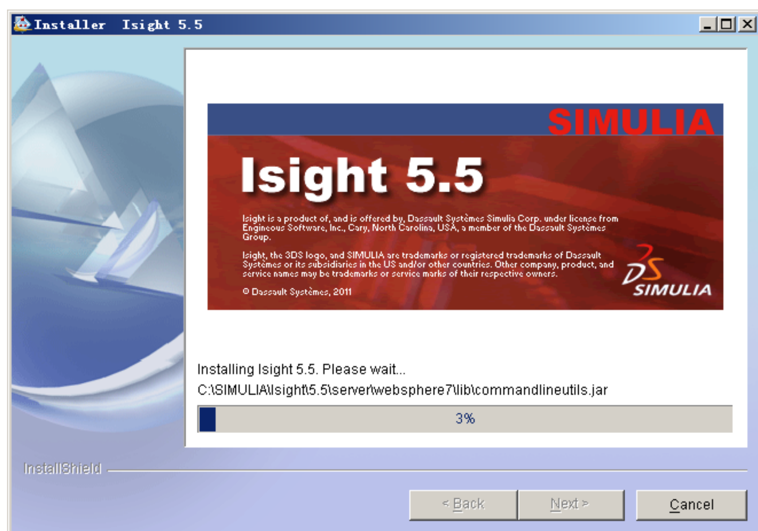


图 7-13　安装进度

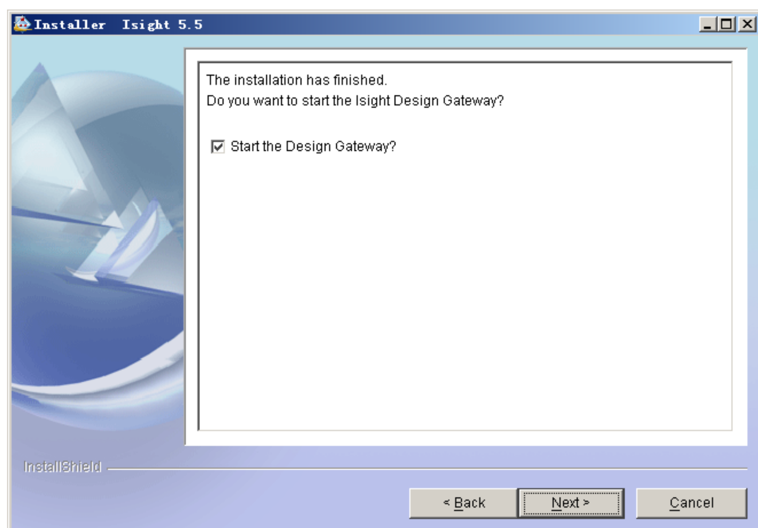


图 7-14　安装完成

7.3　Isight 软件优化工具

Isight 软件拖拉组件建立仿真工作流并进行优化探索，优化探索的方法包括试验设计、多种优化算法、近似模型和质量工程方法等，同时包含确定性优化方案和随机优化方案。

Isight 软件优化方案具有如下特点：

- 支持不同的设计变量类型，包含实型、整型、离散型。
- 提供高效率的局部优化数值方法。
- 提供全局优化方法。

● 独有的组合优化策略（Task Plan）提高优化效率和精度。
● 针对缺乏优化算法了解的用户提供全智能的 Pointer 优化器。
● 提供多目标优化算法获取 Pareto 非劣解集。
● 提供数据挖掘工具辅助多目标权衡分析决策。
● 丰富的空间探索方法（DOE）及其专业后处理。
● 提供多种近似模型方法提高优化效率。
● 提供虚拟现实的设计空间可视化技术（VDD）。
● 层级任务管理和丰富算法库，实现多学科优化策略。
● 提供基于统计的方法评估设计质量。
● 提供稳健性设计和可靠性设计方案。
● 支持并行和分步计算。

7.3.1 试验设计（DOE）

试验设计是数理统计学的一个分支，是当今产品开发、过程优化等环节中最重要的统计方法之一。DOE 方法的用途包括：

● 辨识关键的试验因子。
● 确定最佳的参数组合。
● 分析输入参数与输出参数之间的关系和趋势。
● 构建经验公式和近似模型。
● 提高设计的稳健等。

（1）DOE 方法的运用步骤

DOE 运用共有试验计划、执行试验和结果分析 3 个步骤。如表 7-3 所示，Isight 提供了方便的图形用户界面，使用 DOE 的运用过程更加简单、方便。选择 DOE 方法应主要考虑以下几个方面：

1）工作量：试验尽可能地简单，试验次数尽可能地少。

2）试验范围及每一个参数的取值：要求设计者对设计问题有初步的认识，能够提炼出试验设计的因子，以及试验中各个因子应取的水平值。

3）对结果的合理解释：需要借助一定的后处理工具，帮助进行试验设计的后处理工作，以得出试验设计要得到的结论。

表 7-3　DOE 方法的运用步骤

步　骤	名　　称	内　　容
1	试验计划	定义试验设计因子以及它们的属性（类型、水平） 选择试验设计方法 指定要研究的交互作用 生成设计矩阵 确定对响应的分析
2	执行试验	按照已经制定好的试验计划，执行试验设计的操作
3	结果分析	帮助设计者对 DOE 的试验结果进行分析，并得出响应的结论，包括试验数据表格、散点图、ANOVA 分析表、Pareto 图、主效应图、交互效应图和相关性图等

通过试验设计（DOE）方法，可以了解和评估各设计变量对设计目标的影响，以便于进

行设计参数的筛选以减少优化问题规模。DOE 算法的定义模块如图 7-15 所示。

通过 DOE 试验设计方法，可以获得设计空间信息（设计变量对目标函数与约束的影响），去除大量设计变量，确定最优影响力的设计变量，为构造近似模型提供样本数据库，以得到优化设计的粗略估算。

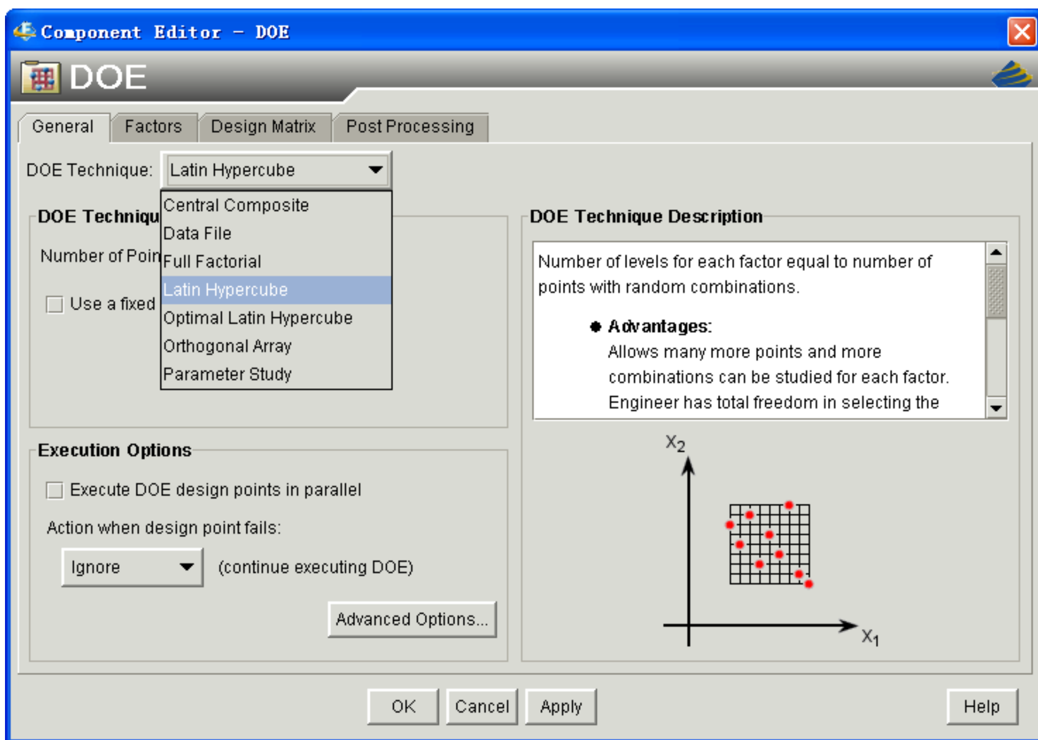


图 7-15 DOE 算法的定义模块

（2）试验设计（DOE）方法的种类

1）参数试验（Parameter Study）。独立参数的敏度分析（一次改变一个参数来分析参数的影响）。

2）全因子法（Full Factorial Design）。为每个因子指定任意水平数并研究所有因子的所有组合。

3）部分因子设计（Fractional factorial）。取全因子设计中的部分样本进行试验（通常为 1/2，1/4 等），包括了 2 水平、3 水平和混合水平组合。

4）中心复合法（Central Composite Design）。它是基于统计学的方法，在方法中，一个 2 水平的完全析因试验被扩充了，其方法是给每个因子增加一个中心点和两个附加点。因此，需要每个因子指定 5 个水平，并且使用中心复合设计来研究 n 个因子要进行 2^n+2n+1 个设计点的评估。

5）正交数组法（Orthogonal Arrays）。部分因子试验的一种，通过仔细构造试验方案，保证因子的正交性（整齐可比和均匀分布）。

6）超拉丁方法（Latin Hypercube）。每个因子的水平等于点数，并进行随机组合。

7）优化拉丁方法（Optimal Latin Hypercube）。使传统拉丁超立方生成的抽样点更加均匀。

8）自定义表（Data File）。用文件输入用户定义的 DOE 矩阵，从中读取需要进行分析的数据点。

（3）DOE 后处理工具

利用 Isight 软件提供的专业 DOE 后处理工具，可以获得 Pareto 贡献率、主效应（Main Effect）、交互效应（Interactive Effect）等有用的图表。

1）Pareto 贡献率图（Pareto Graph）。Pareto 贡献率图反映样本拟合后模型中所有项对每个响应的贡献程度百分比，如图 7-16 所示。Pareto 图的生成方法为：

① 在 Design Gateway 主界面中，单击右侧的 Graph Template 属性页；或在 Runtime Gateway 主界面中，单击右侧的 Graph 属性页。

② 单击工具栏上的按钮，打开 Graph Creation Wizard 向导对话框。

③ 选择 DOE 属性页，单击 Pareto Graph 选项即可。

2）主效应图（Main Effect）。主效应图是因子在某个水平时所有试验中响应的平均值。可以通过方差分析确定因子的主效应，如图 7-17 所示。

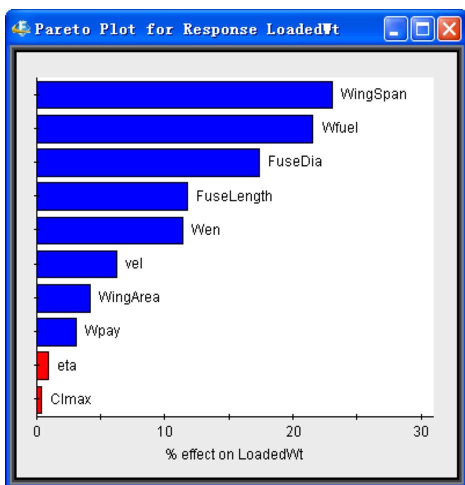


图 7-16　Pareto 贡献率图

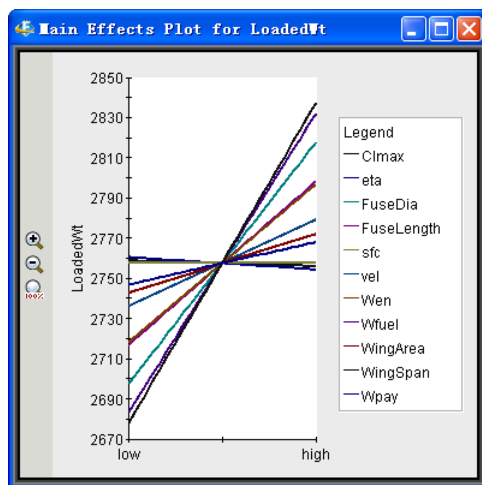


图 7-17　主效应图

从概念上说，改变单个因子的水平，用每个水平和其他因子所有可能的组合对结果的影响的平均值所画的图就是主效应图。主效应图的生成方法为：

① Design Gateway 主界面中，单击右侧的“Graph Template”属性页；或在“Runtime Gateway”主界面中，单击右侧的“Graph”属性页。

② 单击工具栏上的按钮，打开“Graph Creation Wizard”向导对话框。

③ 选择“DOE”属性页，选择“Main Effect”选项即可。

3）交互效应图（Interaction Effect）。交互效应图根据主效应分析的结果，反映某两个因子的交互性对响应的关系和程度，其绘制方式是在第二个因子取不同水平的情况下，分别绘制第一个因子对响应的主效应图，然后叠加而成。如果两条线相互平行，则表示无交互效应作用；如果两条线不平行或交叉，则表示交互作用。不平行的程度反映了交互效应的强弱。交

互效应如图 7-18 所示。

在 Isight 中生成交互效应图的方法为：

① Design Gateway 主界面中，单击右侧的“Graph Template”属性页；或在“Runtime Gateway”主界面中，单击右侧的“Graph”属性页。

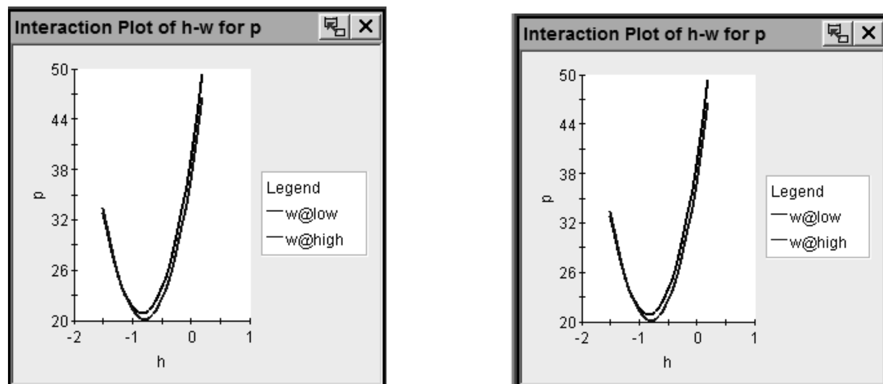


图 7-18　交互效应图（Interaction Effect）

② 单击工具栏上的按钮，打开“Graph Creation Wizard”向导对话框。

③ 选择“DOE”属性页，选择“Interaction Graph”选项即可。

7.3.2 优化方法（Optimization Method）

Isight 软件包含的优化算法包括数值算法、全局探索算法、多目标优化算法、全自动智能优化器和算法组合等几大类，如表 7-4 所示。

表 7-4　Isight 软件优化算法表

类　　别	组　　件
数值算法	Hook Jeeves 模式搜索法 简约下降梯度法（LSGRG2） 序列二次规划法（NLPQL） 修正可行方向法（MMFD） 单纯型下山法（Downhill Simplex） 整数规划法（MOST） 满应力法（Stress Ratio Optimize） 直接法（DIRECT Optimization）
全局探索算法	多岛遗传算法（MIGA） 自适应的模拟退火法（ASA）
多目标优化算法	邻域培植遗传算法（NCGA） 非支配解排序的多目标遗传算法（NSGAII） 基于自适应变异遗传算法（AMGA） 粒子群法
全自动智能优化器	Pointer
算法组合	Task Plan



（1）数值优化算法

数值优化算法在工程设计中有着普遍应用，它具有如下特点：

1）高效性。数值优化遍寻当前设计点周围的区域，会在最快上升的方向上迅速有效地移动，能很快地获得邻近的最优值。

2）收敛性。数值优化有着可靠的数学基础，能证明在给定条件下的收敛性。

3）局部性。数值方法容易陷于局部极值。

（2）全局优化探索方法

相比较数值优化方法而言，全局优化探索方法具有全局性但相对效率较低的特点，Isight 软件提供的全局优化探索方法有：

1）多岛遗传算法 MIGA（Multi-Island Genetic Algorithm）。

2）自适应的模拟退火法 ASA（Adaptive simulated annealing）。

Isight 软件还提供了从全局到局部的优化策略，取长补短，全局探索，局部加速收敛。

（3）多目标优化算法

Isight 软件提供了处理多目标优化问题（MOOP）的两类方案，一种是通过设定权值自动将多目标问题转变为单目标问题；另一种则无需事先指定权值，可以获取整个支配解集，即所谓 Pareto 解集。

Isight 软件还提供了一个多目标决策工具：工程数据挖掘模块（EDM），如图 7-19 所示。

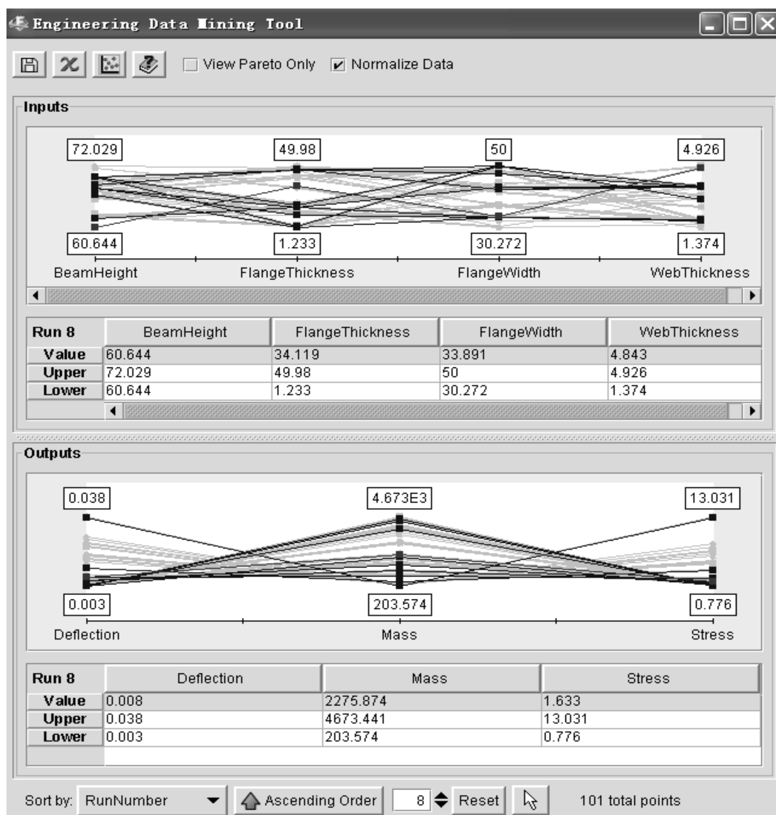


图 7-19　Isight 提供的数据挖掘工具 EDM

（4）智能优化器 Pointer

Pointer 全能优化器可以根据设计空间的性质自动组合使用 4 种优化算法快速优化设计问题，得到高效的优化结果。

Pointer Optimizer 可以控制 4 种优化算法的组合，由于 4 种方法分别适用于不同类型的优化问题，在优化历程中，Pointer 优化器通过探测设计空间的性质而自动选择最适用的算法来寻优，对于不了解算法理论的工程师而言是非常有用的工具。

（5）基于近似模型的优化

近似模型是一种数学模型，能够近似模拟一组输入（独立设计变量）和输出（响应）之间的关系。近似模型可以代替耗时的仿真、平顺设计设计空间、更好的理解输入/输出关系、减少优化时陷入局部解的可能性，可以与多种策略进行组合（DOE，Optimization，Monte Carlo，质量方法等）。

Isight 软件提供的近似模型包括：

1）响应面近似模型（Response Surface Method，RSM）。对采样点使用最小二乘的方法获取近似模型，可以构造线性、二阶、三阶、四阶模型，提供方法自动选择多项式的项提高拟合度。

2）Kriging 近似模型。

3）RBF 神经网络模型。用于高度非线性的模型。

Isight 软件的近似模型功能具有如下特点：

1）在工作流中拖曳使用。

2）智能导向式（Wizard）。

3）能进行近似模型精度分析（Error Analysis）。

4）近似模型可视化：提供虚拟现实的可视化工具（Visual Design Driver），可以交互的用不同的视角查看设计空间。

5）对一个组件可以建立多层近似。

在近似模型的基础上进行优化迭代时，可能会出现因为近似模型的精度问题而引起最终优化结果违反约束的现象。Isight 软件的 Exploration 组件提供了内外循环策略（Approximation Loop Exploration Strategy），可以在优化迭代过程中自动检验近似模型的精度，如果不满足要求，可以自动采样并重构近似模型，直到实际仿真和近似模型的吻合度达到要求为止，如图 7-20 所示。

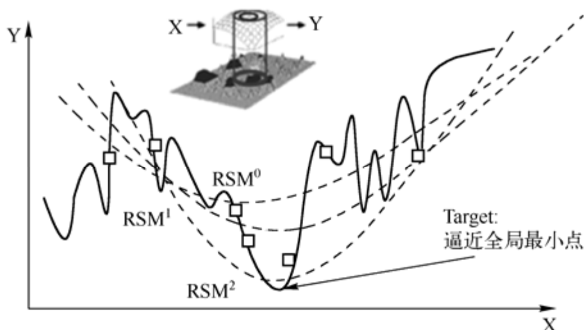


图 7-20　Isight 软件近似模型迭代探索策略原理示意图

如果算法发现最初的近似模型 RSM^0 不满足实际精度的需要，Isight Exploration 方法会采样并构造 RSM^1，然后在 RSM^1 上进行寻优，如果还不满足精度要求，则继续采样并构造 RSM^2，在 RSM^2 上进行优化，直到满足精度要求为止。这种内外循环的方法将近似模型在优化中的应用可靠度和精度都大幅提高。

7.4 优化流程搭建

7.4.1 流程建立（Design Gateway）

在 Isight 软件 Design Gateway 界面中的 Sim-flow 工作流属性页上构建工作流程（Workflow）时，可以从组件面板取用需要的组件直接拖曳和剪切/粘贴的方式在图形界面装配成工作流。对工作流模型的结构没有任何限制，支持条件、等待、跳转、分层等复杂设计工作流的驱动，如图 7-21 所示。

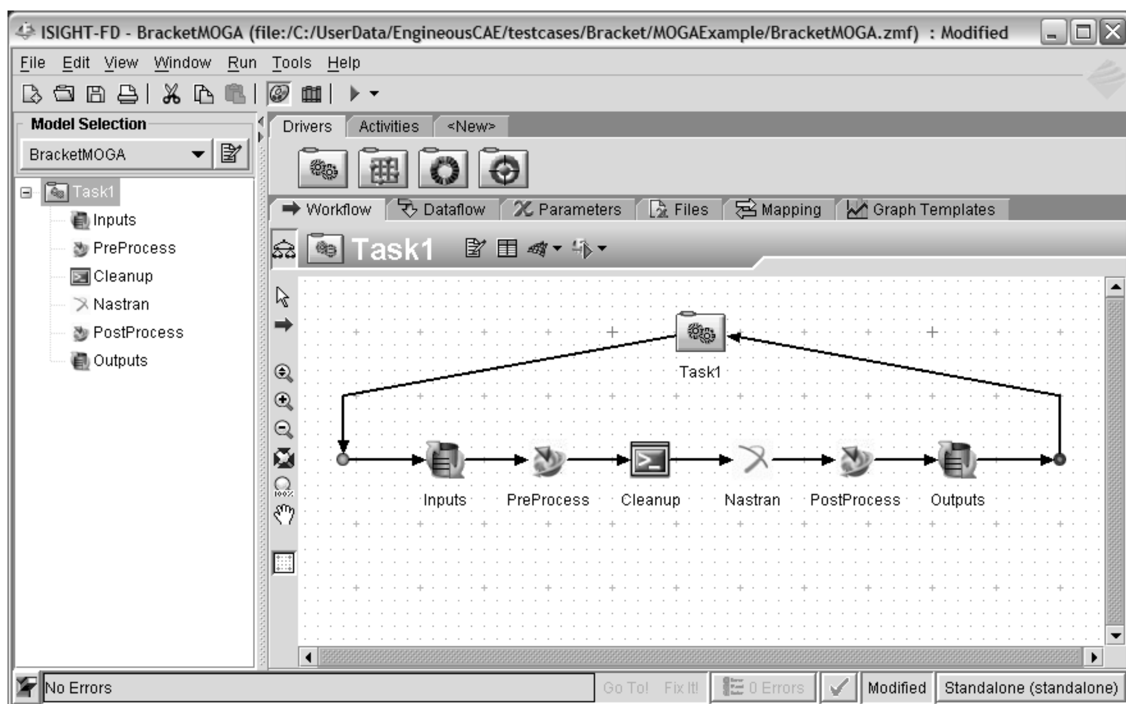


图 7-21 Isight 软件仿真流程（Simflow）

7.4.2 数据流可视化

Isight 软件根据参数关系可以在构建工作流（Workflow）后自动生成参数数据流（Dataflow），数据流视图可以帮助用户监控组件间的参数流传递情况，如图 7-22 所示。

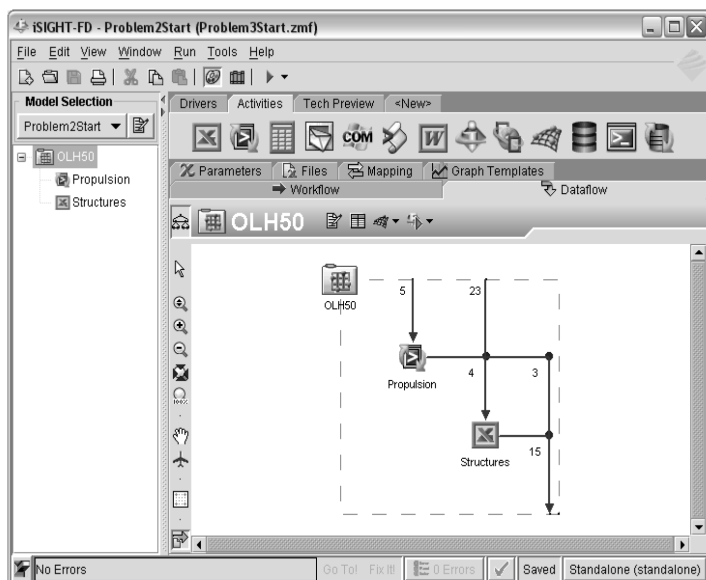


图 7-22　数据流（Dataflow）

7.4.3 Loop 循环控制

用户可以使用 Loop 组件驱动子流程的循环执行，如图 7-23 所示。Loop 组件包含 5 种循环类型。

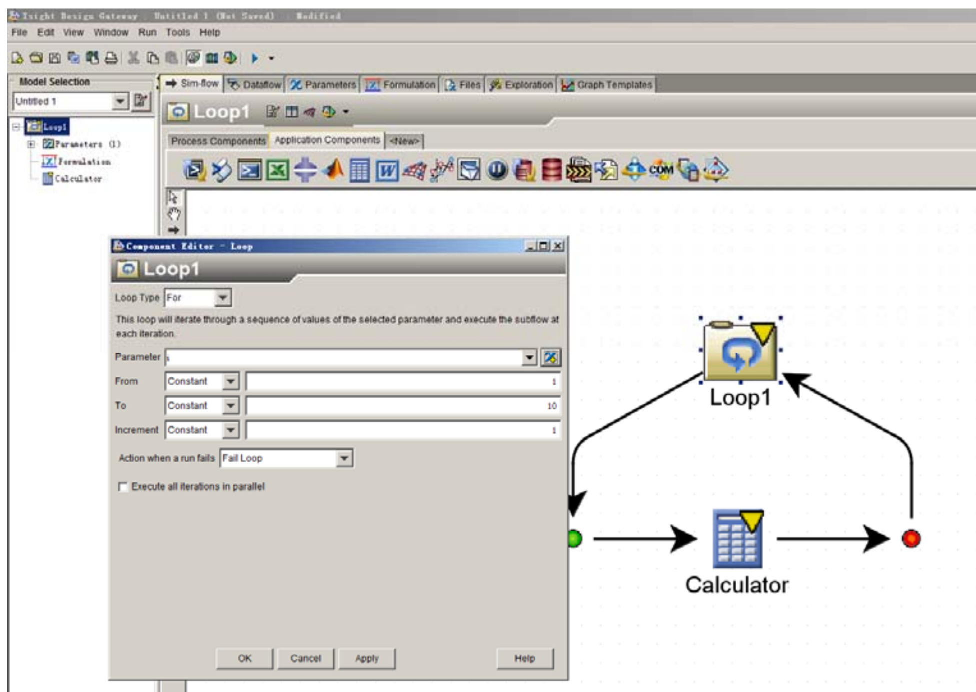


图 7-23　Loop 变量设置及循环方法选择

1）For：按照指定的控制参数实现循环执行。

2）For Array：遍历指定的数组元素实现循环执行。

3）For Each：遍历指定的参数列表实现循环执行。

4）While：当控制条件满足时进行循环迭代。

5）Do Until：循环执行直到指定条件满足。

7.4.4 Condition 条件控制

Isight 软件允许用户控制流程的运行条件，包括：

- 总是执行 always execute。
- 从不执行 never execute。
- 条件执行 conditionnally execute。

具体操作如下：

1）在 Design Gateway 中右击两个组件之间的连线（如图 7-24 中虚线框所示）。

2）选择弹出的快捷菜单中的 Edit Condition（条件控制编辑）选项，弹出 Sim-flow Conditions 对话框。

3）选择合适的运行条件，即 Always execute、Conditionally execute 或 Never execute。

4）若是条件执行，在 Condition 编辑判断条件，在 Label 文本框中输入该条件控制的名称，如图 7-24 所示。

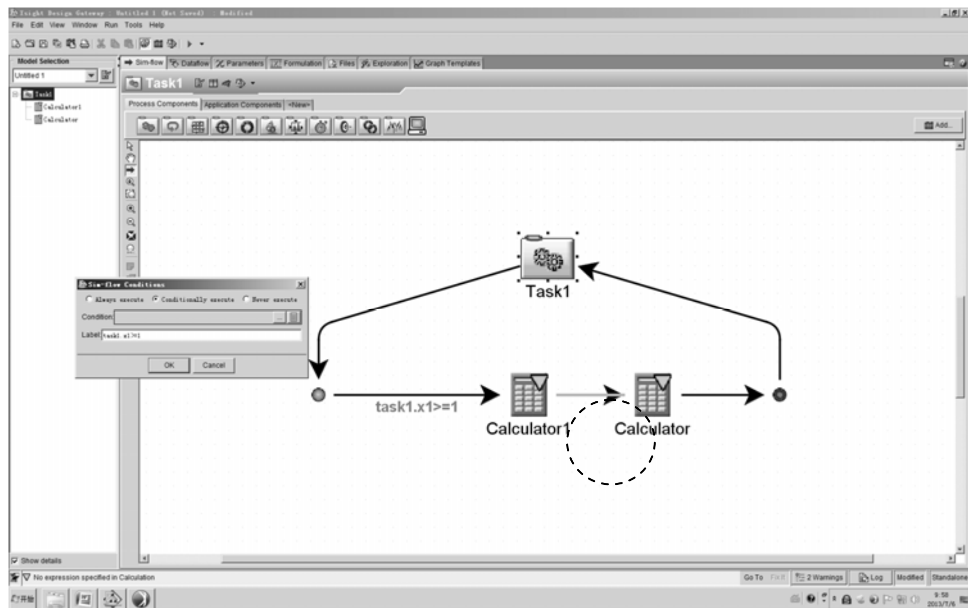


图 7-24　输入条件控制的名称

5）单击“OK”按钮完成。

7.4.5 Parameter 参数控制

Isight 软件支持的数据结构（Structrue）包括：

（1）Scalar：标量

可以是多种数值类型，具体如下。

1）Real 实数型。

2）Integer 整数型。

3）String 字符串型。

4）Boolean 布尔型。

（2）Array：数组

通常数组的长度需要预先制定，但是 Isight 软件也支持可变长度数组，在数组变量名后会以“*”号表示可变长度数组。

（3）Aggregate：结构数据

比如，可以用一个名为 Point 的 Aggregate 数据结构封装一个点的（x，y，z）三个坐标分量。

添加参数的方法如下：

1）在“Design Gateway”界面的“Sim-flow”或左侧任务树中，选择待添加参数的组件。

2）在 Parameters 属性页（见图 7-25）中，单击 New 按钮，弹出“Add Parameter”对话框。

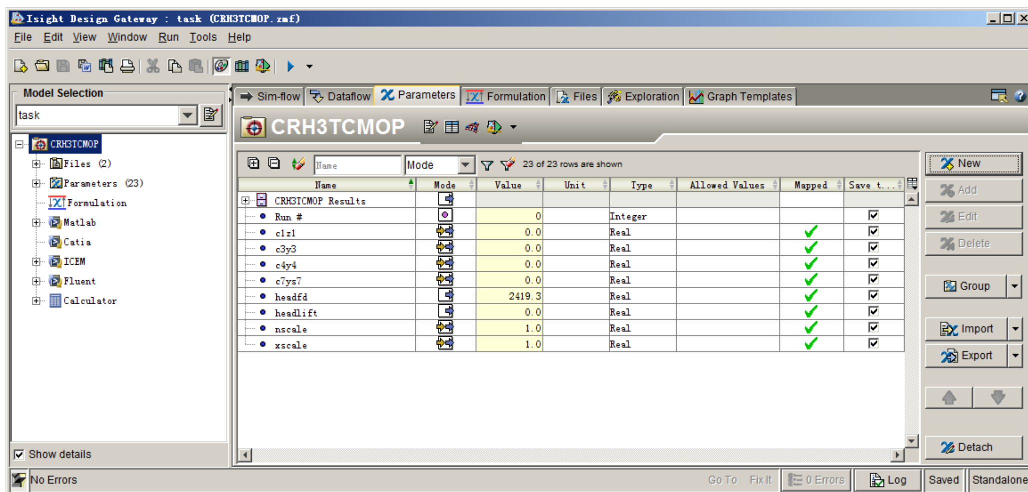


图 7-25　参数设置界面

3）在“Name”文本框中输入参数名，如图 7-26 所示。

提示： 参数名不能包含方括号（[ ]）和小数点（.）。

4）选择参数的数据结构类型：在“Structure”数据结构下拉列表框中，选择“Scalar”“Array”或者“Aggregate”。

5）选择参数的方向和作用域：在“Model”下拉列表框中，选择“Input”（输入参数）、“Output”（输出参数）、“In/Out”（即为输入也为输出）或“Local”（局部变量，只在该组件内有效，组件之外不可见）。

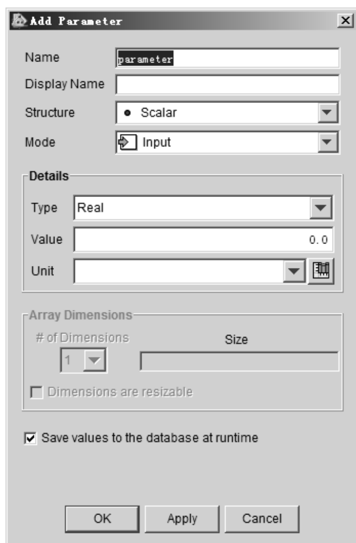


图 7-26　变量名编辑对话框

7.4.6 数据映射（Data Mapping）与数据结构化矩阵（DSM）

Isight 软件对同名不同组件间的参数可以自动映射，也允许用户根据实际仿真流程拖曳映射组件间的参数。通过自动生成的多学科结构设计矩阵（DSM），可以监控组件间的参数流传递。组件间的同名参数可以自动映射，也支持拖曳式手动映射参数，如图 7-27 所示。

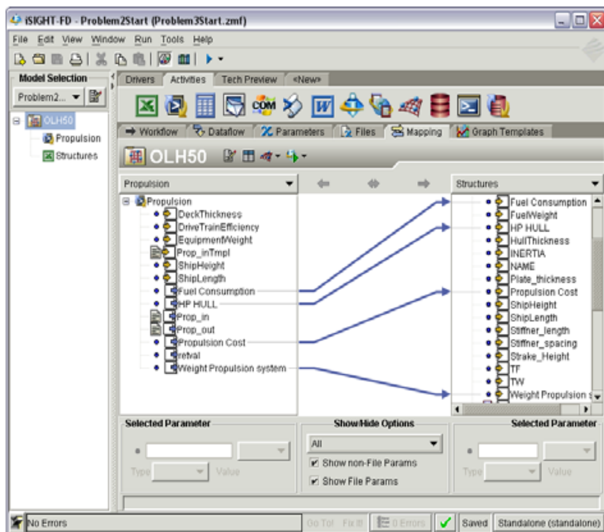


图 7-27　数据映射（Data Mapping）

7.4.7 方案监控（Runtime Gateway）

（1）任务状态监控

Isight 软件方案监控可以对任务进行可视化监控，可以查看工作流中任何一个任务节点

的运行状况。Isight 软件运行门户（Runtime Gateway）同时可以对数据流（Dataflow）、参数历史等进行监控，如图 7-28 所示。

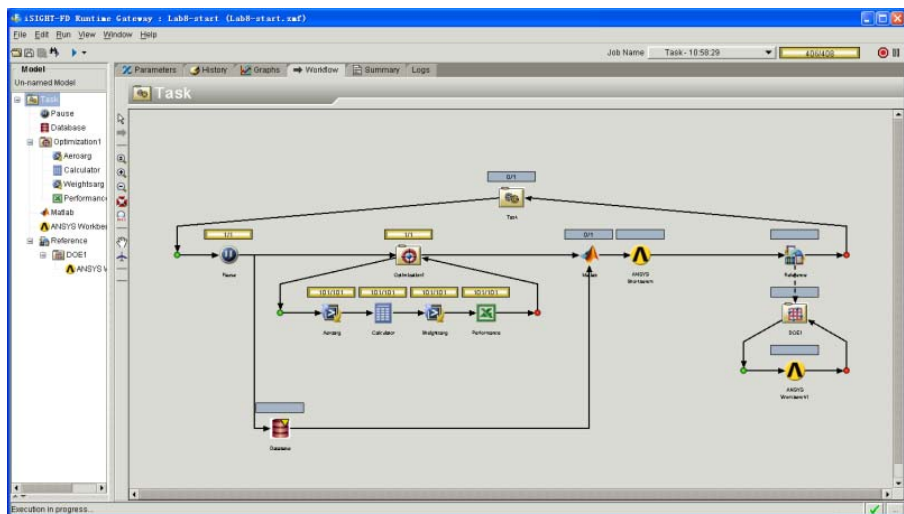


图 7-28　Isight runtime gateway 监控工作流运行

（2）图表监控

Isight 中自动生成试验设计、优化后的各种后处理图表，可以对数据表进行过滤筛选，如筛选可行设计、改进的设计等，提供 EDM 工具对数据进行分析。图 7-29 所示为 Isight 软件自动生成表监控优化历程。图 7-30 所示为 Isight 软件后处理自动生成图监控优化历程。

iSIGHT-FD Runtime Gateway : Untitled 1

File　Edit　Run　View　Window　Help

Job Name　Untitled 1 - 16:07:11　203/203

Model　Untitled 1　Optimization1　Calculator　Simcode

Parameters　History　Graphs　Workflow　Summary　Logs

Optimization1

Run Path			Parameters for all Iterations (Done)							
✓			a	b	Design Feasibility	Objective and Penalty	Objective Function	Penalty Function	retval	x	y
✓	1	69	-4.04216212	-5.31498303	7	-127.5591905063	-127.5591905063	0.0	0	-25.1806330	-102.3
✓	1	70	0.77849004	0.0	7	-42.9409847749	-42.9409847749	0.0	0	-44.9697662	2.0287
✓	1	71	-8.67440753	-5.66341050	7	-638.6220720022	-638.6220720022	0.0	0	63.5097586	-702.1
✓	1	72	-6.98895397	-5.64151310	7	-379.0755084747	-379.0755084747	0.0	0	8.10786535	-387.1
✓	1	73	-9.17659615	-5.88196414	7	-746.0827772854	-746.0827772854	0.0	0	79.6283171	-825.7
✓	1	74	-0.44914326	0.05123885	7	-47.7882587495	-47.7882587495	0.0	0	-46.7967412	-0.991
✓	1	75	-4.94224351	-4.76679579	7	-176.7760386585	-176.7760386585	0.0	0	-23.4511014	-153.3
✓	1	76	-0.06175171	0.0	7	-48.1046725277	-48.1046725277	0.0	0	-47.9809336	-0.123
✓	1	77	-7.22944797	-6.23755711	7	-423.012212368	-423.012212368	0.0	0	8.20030789	-431.2
✓	1	78	-0.44224974	-0.03729621	7	-48.1208535608	-48.1208535608	0.0	0	-47.1484657	-0.972
✓	1	79	-7.29286798	-6.07241302	7	-428.1938900295	-428.1938900295	0.0	0	11.1439647	-439.3
✓	1	80	0.04627721	-0.14716023	7	-47.7771888304	-47.7771888304	0.0	0	-47.8481862	0.0709
✓	1	81	-7.98674699	-5.66086998	7	-520.0516360053	-520.0516360053	0.0	0	37.4269429	-557.4
✓	1	82	-6.55740297	-5.86530462	7	-332.5663409034	-332.5663409034	0.0	0	-3.08446569	-329.4
✓	1	83	-9.17659615	-5.83608301	7	-744.3274282474	-744.3274282474	0.0	0	80.8460289	-825.1
✓	1	84	-9.54761709	-5.66341050	7	-817.9962746259	-817.9962746259	0.0	0	103.505235	-921.5
✓	1	85	-4.43807614	-5.33666737	7	-149.844441356	-149.844441356	0.0	0	-25.0736153	-124.7
✓	1	86	-9.35954252	-5.83072529	7	-783.2108267154	-783.2108267154	0.0	0	89.4112404	-872.6
✓	1	87	-9.61296156	-5.93356999	7	-844.1969095017	-844.1969095017	0.0	0	98.5607192	-942.7
✓	1	88	-9.65988854	-5.83072529	8	-850.7512174847	-850.7512174847	0.0	0	103.963411	-954.7
✓	1	89	-9.65988854	-5.83072529	8	-850.7512174847	-850.7512174847	0.0	0	103.963411	-954.7
✓	1	90	-9.17659615	-5.88196414	7	-746.0827772854	-746.0827772854	0.0	0	79.6283171	-825.7
✓	1	91	-8.67440753	-5.66375374	7	-638.634227655	-638.634227655	0.0	0	63.5014910	-702.1
✓	1	92	-4.94224351	-4.76645255	7	-176.7722841583	-176.7722841583	0.0	0	-23.4506192	-153.3
✓	1	93	-8.31286167	-5.50190412	7	-568.636317579	-568.636317579	0.0	0	52.7095985	-621.3
✓	1	94	-4.03887646	-4.83237460	7	-126.4827825602	-126.4827825602	0.0	0	-29.1689197	-97.31
✓	1	95	-8.67440753	-5.87228423	7	-645.8884083577	-645.8884083577	0.0	0	58.6529259	-704.5
✓	1	96	-6.51438977	-5.63052402	7	-323.6223764336	-323.6223764336	0.0	0	-2.43785117	-321.1
✓	1	97	-9.65988854	-5.83072529	8	-850.7512174847	-850.7512174847	0.0	0	103.963411	-954.7
✓	1	98	-9.47447732	-5.83072529	7	-808.5561593722	-808.5561593722	0.0	0	94.8734357	-903.4
✓	1	99	-4.94224351	-4.76679579	7	-176.7760386585	-176.7760386585	0.0	0	-23.4511014	-153.3
✓	1	100	0.0	0.46078348	7	-47.3630357401	-47.3630357401	0.0	0	-47.1507143	-0.212
✓	1	101	-9.65988854	-5.83072529	8	-850.7512174847	-850.7512174847	0.0	0	103.963411	-954.7

Not all parameters of the selected component may be shown. Use the "Configure" button to edit the list of parameters that are shown.　Configure

Show subflow data　Auto-Scroll

Standalone (standalone)

图 7-29　Isight 软件自动生成表监控优化历程

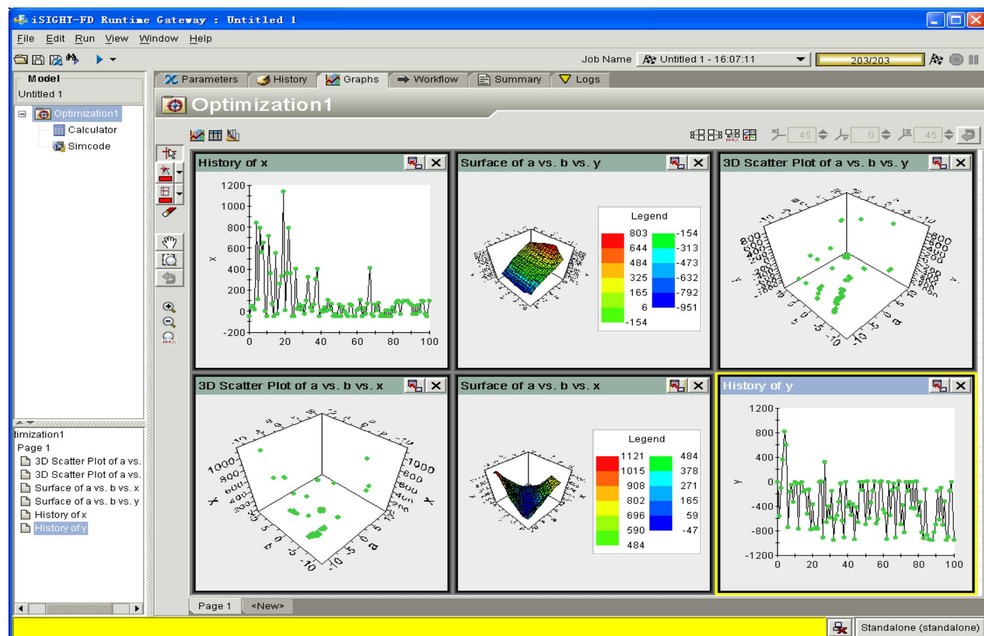


图 7-30　Isight 软件后处理自动生成图监控优化历程

（3）Word 格式化报告自动生成

Isight 可以全自动化直接生成格式化的分析报告，报告内容包含标题、目录、概述、工作流、参数、算法设置、关键结果数据和图表等。

7.4.8 数据管理

Isight 软件可以发布（Publish）流程和组件到数据库（Design Gateway）中。Isight 软件允许将组件或工作流直接发布到数据库中，入库后可由 Isight Library 进行管理。可以对发布的组件所在目录，组件显示名称、描述、版本等信息进行编辑。

7.4.9 Isight 组件与流程库管理 Isight Library（Design Gateway）

Isight 软件可以将发布的组件和流程存储于本地数据库，并提供可视化页面浏览、条件查找组件和流程。

（1）浏览（Browse）

Isight 软件提供浏览所有存储于数据库中的仿真流程和组件的功能，如图 7-31 所示。

（2）查询（Search）

查询功能分为普通查询（Basic Search）和高级查询（Advanced Serach）功能。

1）普通查询（Basic Search）。通过输入关键字进行查询，可以根据类别（Category）选项对查询结果进行过滤，通过属性（Attributes）选项对查询结果显示内容进行控制，如图 7-32 所示。

2）高级查询（Advanced Search）。对普通查询的结果属性进行逻辑组合后进行过滤，如图 7-33 所示。

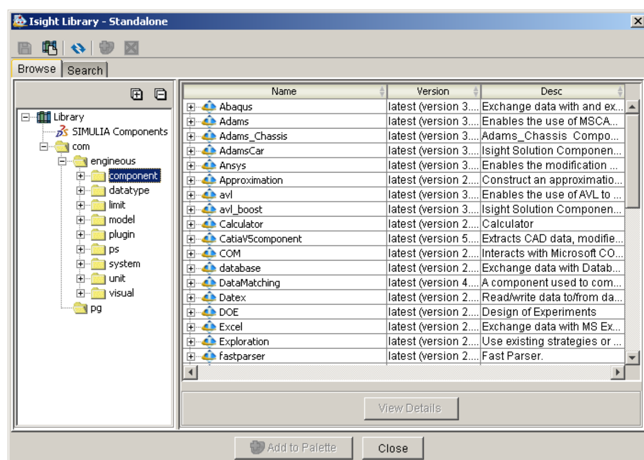


图 7-31　Isight Library 浏览存储于数据库中的仿真流程和组件

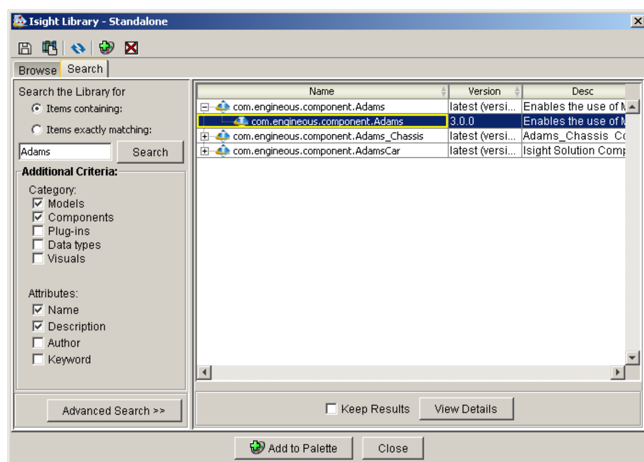


图 7-32　Isight Library 通过关键字查询（普通查询）

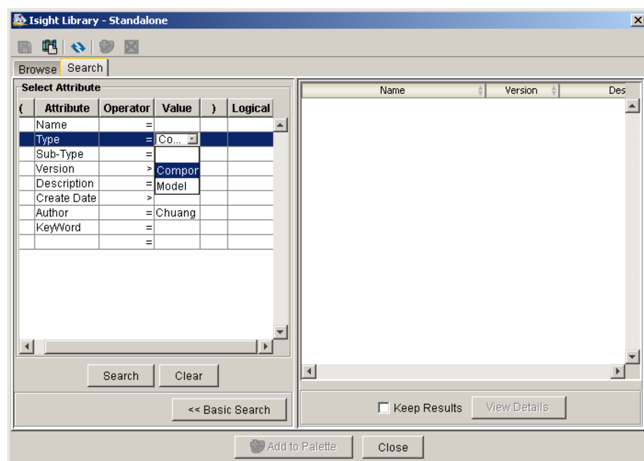


图 7-33　Isight Library 高级查询

（3）查看详细信息

可以对（通过浏览或查询）选中的组件或流程选择 View Details 查看详细信息，包含名称、作者、版本、发布时间和描述等信息，如图 7-34 所示。

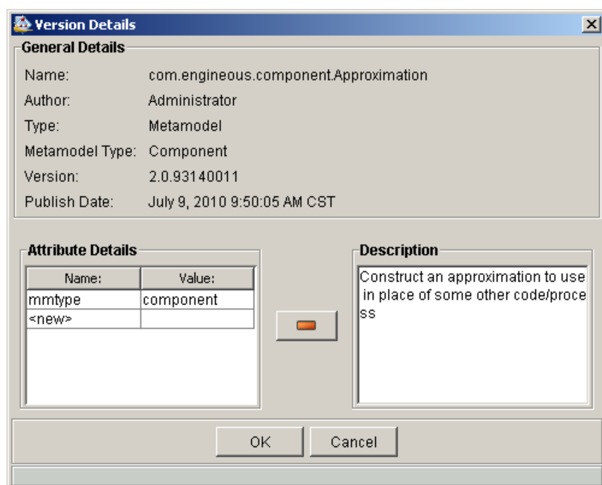


图 7-34　查看组件或流程的详细信息

7.4.10 任务数据库 Job Database（Runtime Gateway）

Isight 使用内嵌的本地数据库来管理任务执行结果。可以在 Isight Preference 对话框中对数据库进行设置，不同操作系统登录用户都分别有自己的数据库，如图 7-35 所示。

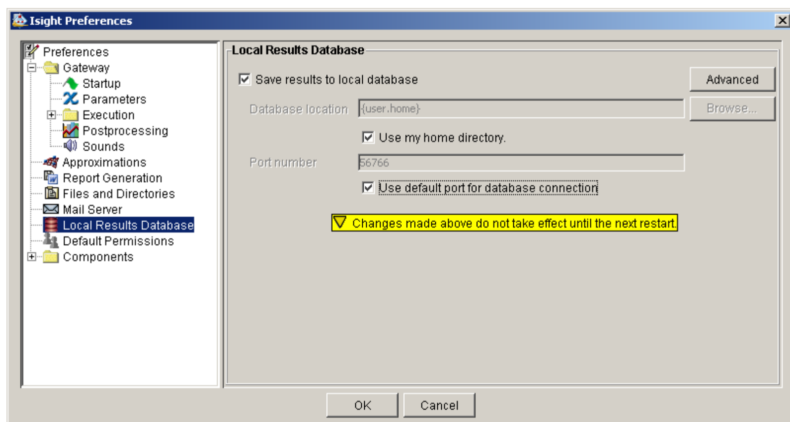


图 7-35　内嵌的本地数据库

对于提交运算的任务，Isight 软件通过本地数据库进行管理和可视化管理界面对任务数据库进行操作。如图 7-36 所示，在管理界面下，可以根据任务名称（Job Name）、提交用户（User）、模型名称（Model Name）、任务状态（Job Status）和任务提交时间等作为关键字进行过滤查询过去提交的任务。对于选中的任务可以重新提交运算（Rerun Job），也可以双击进入 IsightRuntime Gateway 中进行重新提交，查看已经存在的任务运算结果数据以及任务报告等。

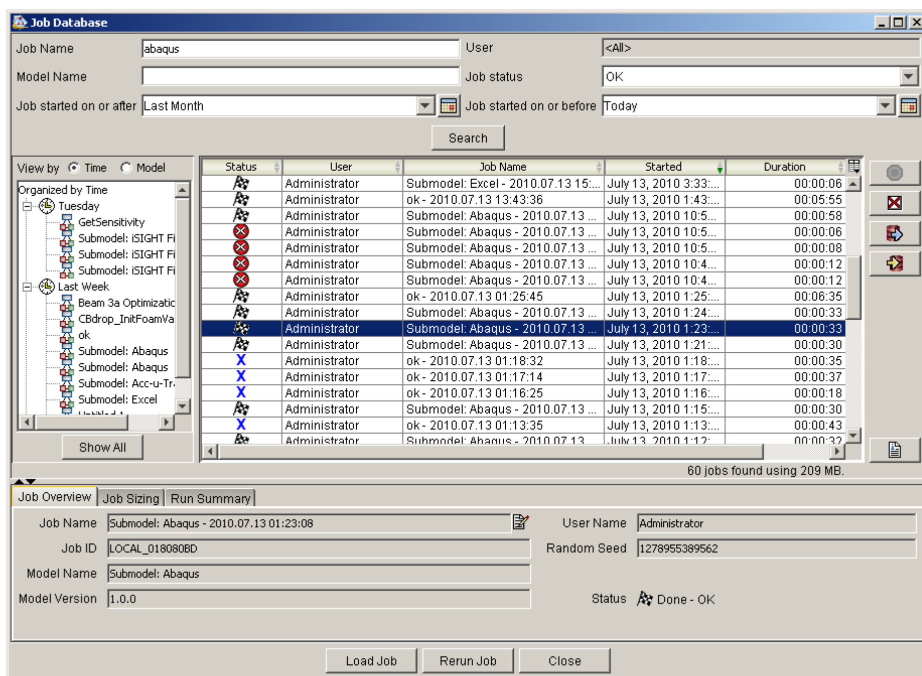


图 7-36 Isight 任务数据库 Job Database 管理界面

通过 Job Database 操作也可以删除（Delete）任务或导出任务（Export Job）为 zrf 包，也可以将 zrf 任务包导入（Import Job）到数据库中以便管理。

第 8 章　弯管阻力优化

本章主要内容：

本章主要介绍 FLUENT 软件与 Isight 软件优化联合仿真分析方法，通过弯管阻力优化案例，让读者学会利用 FLUENT 软件进行单目标优化设计的方法及技巧。

本章学习目标：

✧ 网格变形软件 Sculptor 的基本功能。

✧ 掌握 Sculptor、ICEM、Fluent 软件在 Isight 软件中的基本优化流程的搭建方法。

✧ 批处理文件的编写方式。

✧ 掌握 Isight 软件优化计算的设置方法。

✧ 掌握优化计算结果的分析工作。

8.1　优化流程概述

弯管优化流程搭建时，可以通过从组件面板直接拖曳和剪切/粘贴的方式，从库中取用需要的组件，通过图形对话框搭建工作流；对工作流模型的结构没有任何限制，支持条件、等待、跳转、分层等复杂设计工作流的驱动。通过 Isight 软件搭建的工作流程，可实现多层结构，逻辑清楚，可支持条件控制和并行的任务节点。

本章关于弯管阻力的优化流程搭建方法具体步骤如下：

1）通过 Sculptor 变形软件对弯管的体网格进行变形。

2）通过 ICEM 对网格进行处理。

3）通过 Fluent 流体计算软件对弯管进行计算。

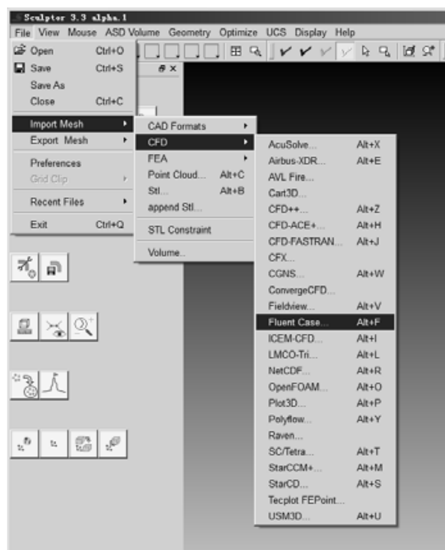
4）通过 Isight 对各个软件进行集成。

8.2　弯管阻力优化应用实例

8.2.1　变形软件 Sculptor 对弯管的体网格进行变形

1）选择菜单项“File”>“Import Mesh”>“CFD”>“Fluent Case…”，打开网格文件“Tutorial_ I.cas”，如图 8-1 和图 8-2 所示。

2）单击左侧图形菜单“Create Volume”创建体网格变形区域，软件左侧显示树形对话框，选择“Create Volume”>“Regions”>“wall”，单击“Apply”按钮生成网格控制区域，如图 8-3 所示，单击“OK”按钮确认操作。



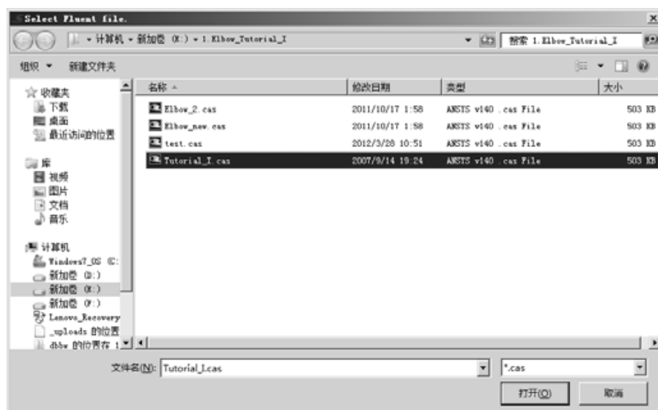


图 8-1　读取 Fluent 网格　　　　图 8-2　读取网格文件

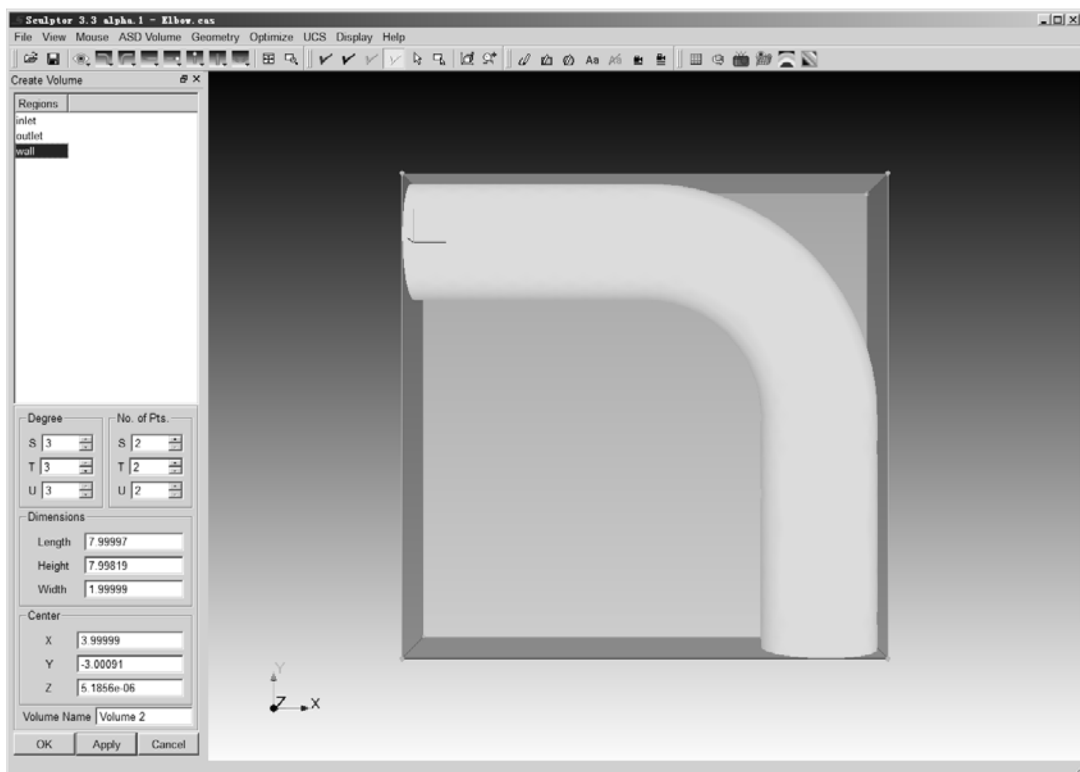


图 8-3　生成网格控制域

3）单击左侧图形菜单“Modify Volume”按钮，软件左侧显示树形对话框，选择“Modify”>“Volume 1”>“t,u#1”对网格控制域进行调整，如图 8-4 所示。

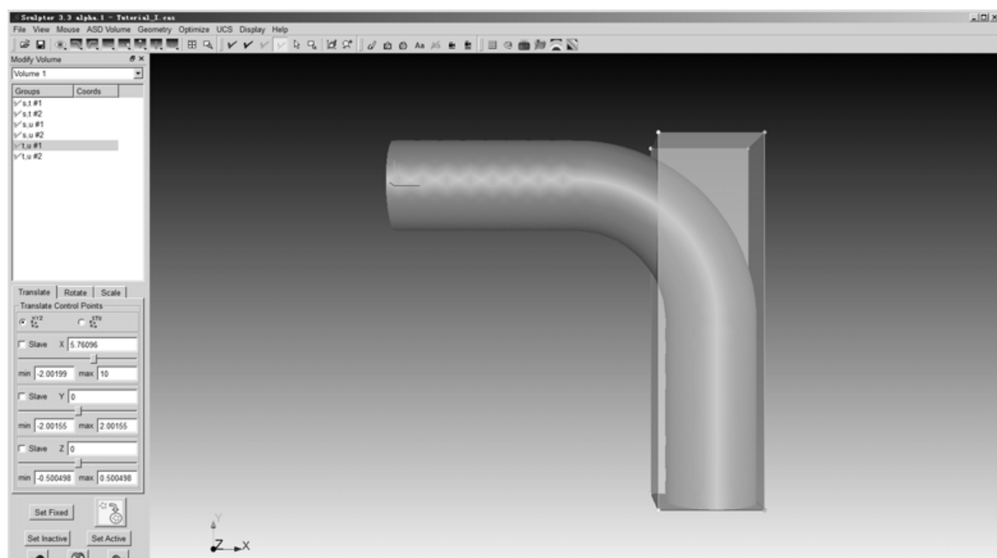


图 8−4　调整网格控制域

4）选择“Modify”>“Volume 1”>“t,u#2”后再选择“Rotate”>“Slave Z(Deg) ”选项，输入“90”并按〈Enter〉键确认操作，单击“Translate”按钮，将 t,u#2 面调整至图 8−5 所示的位置，单击“OK”按钮确认操作。

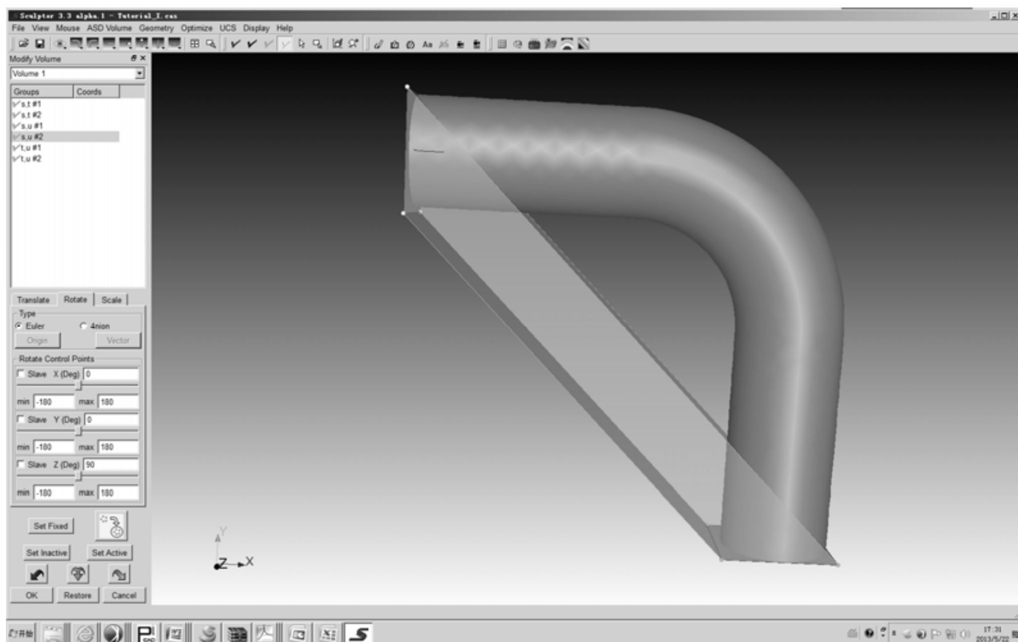


图 8−5　t,u#2 面位置变化

5）单击左侧图形菜单“Insert/Remove Control Points”按钮，选择“t,u#1、t,u#2”两个面，同时选择“Insert/Remove Control Points”>“groups”>“s,u#1 s,u#2”后再选择“Plane”>“Insert Position”>“Between Planes”，单击“Insert”按钮，或者单击按钮，选

择两个面之间的连线插入面，单击“Remove”按钮删除不需要的面，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-6 所示。

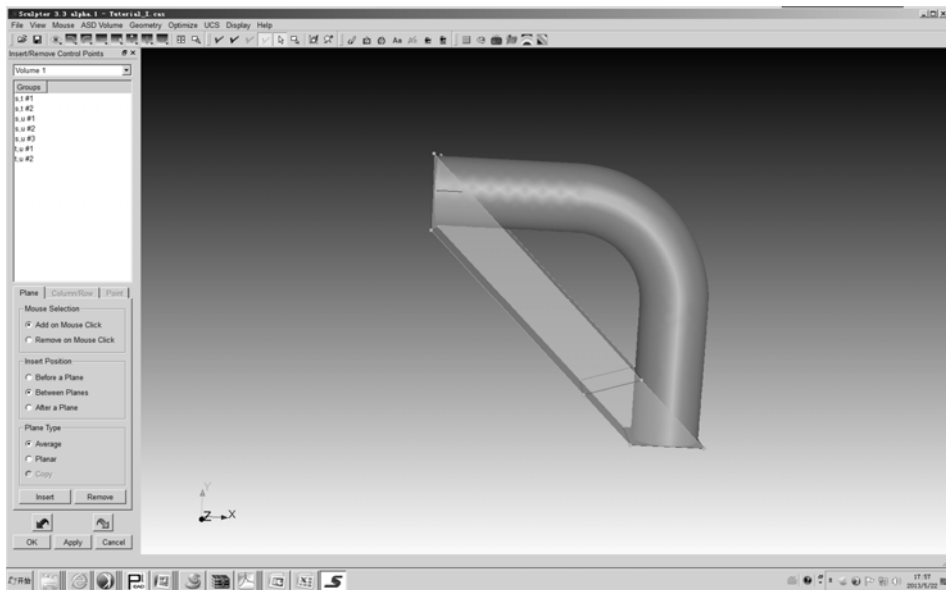


图 8-6　在两个面之间增加控制面

6）按照步骤 5 的方法在“s,u#1”和“s,u#2”两个面之间增加满足控制区域所需的面，单击按钮对控制域的面进行调整，选择“Modify Volume”>“Groups”>“s,u#2 s,u#9 s,u#4 s,u#5 s,u#6”，单击按钮调整所选 5 个面的位置，调整后位置如图 8-7 所示。

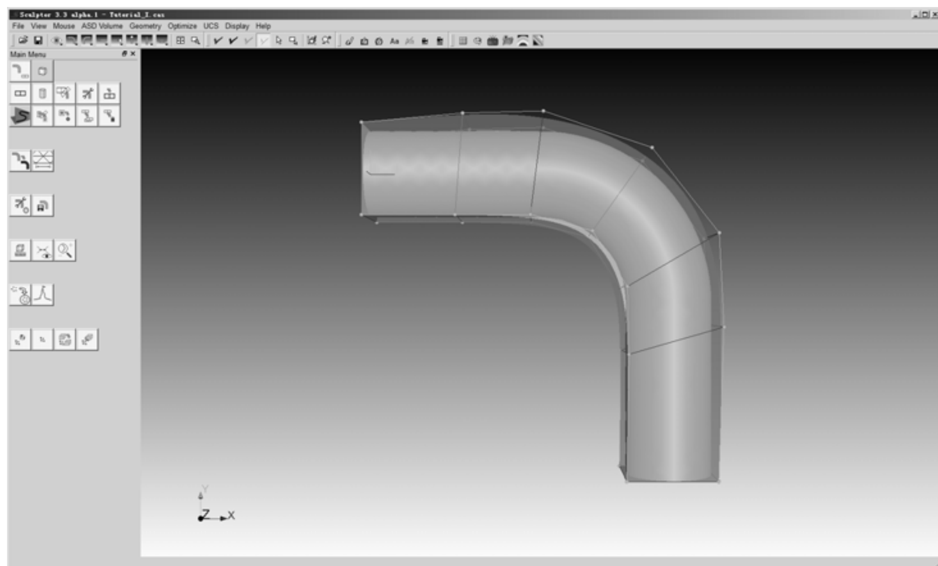


图 8-7　调整中间 5 个面的位置

7）单击软件左侧图形菜单栏按钮冻结控制域上所有的点，窗口弹出“Warning”对话框，询问是否冻结所有节点，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-8 所示。

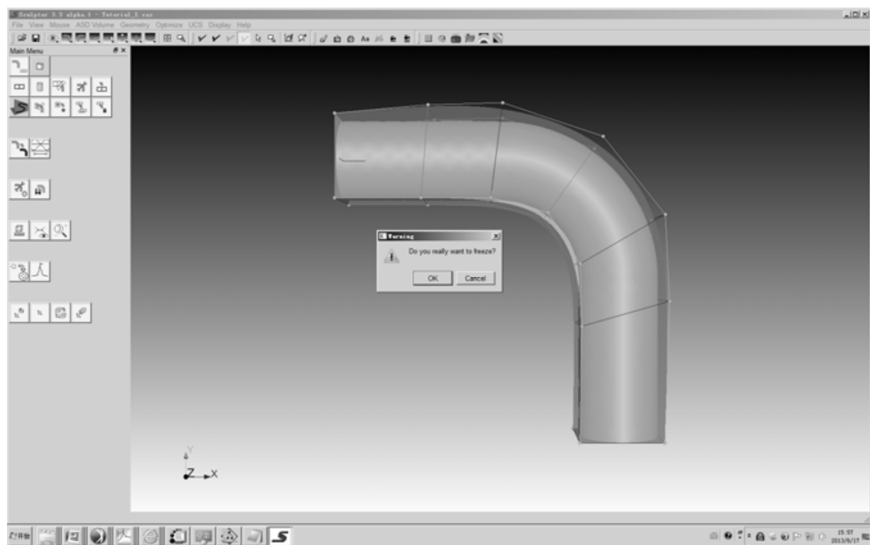


图 8-8　冻结控制域所有控制点

8）设置变量“h”。首先单击图形对话框菜单栏按钮，然后单击按钮，选择需要设置变量的点。选择“X Coefficients，Z Coefficients”>“Remove”选项，对话框中输入“0”，单击 “Set coefficient”按钮确认设置。选择“Y Coefficients”>“Remove”选项，对话框中输入“1”，单击“Set coefficient”按钮确认设置，将此变量命名为“h”，单击“Accept Groups”按钮确认此变量设置。单击“Done”按钮确认操作，如图 8-9 所示。

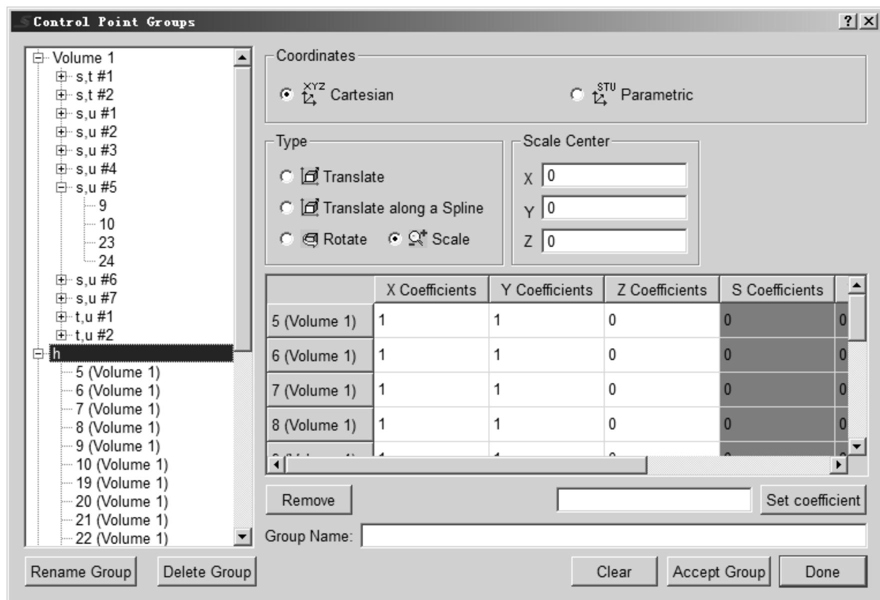


图 8-9　设置变量 h 名称

9）单击图形对话框菜单栏按钮，然后单击按钮，选择需要设置变量的点。选择对话框右侧“Coordinates”>“Cartesian”和“Type”>“Scale”，选择“X Coefficients，Y Coefficients”>“Remove”，对话框中输入“0”，单击“Set coefficient”按钮确认设置，选择

“Z Coefficients” > “Remove”，对话框中输入“1”，单击“Set coefficient”按钮确认设置，将此变量命名为“w”，单击“Accept Groups”按钮确认此变形组合设置，如图 8−10 所示。

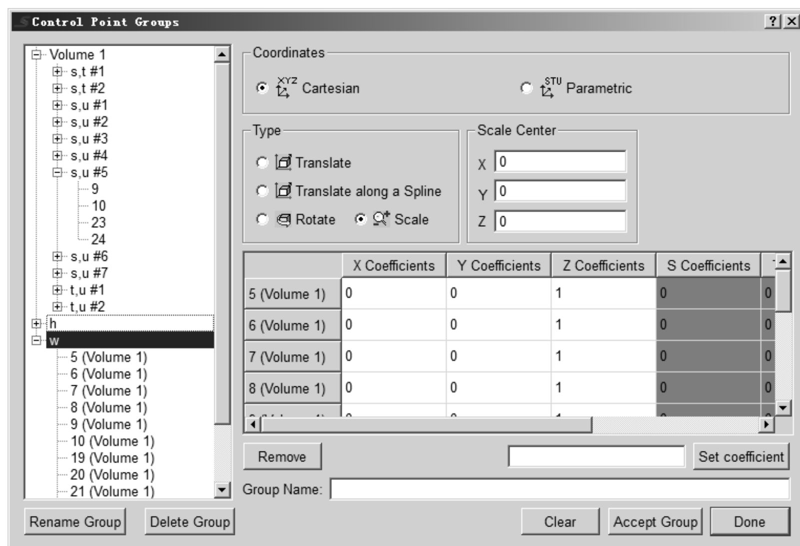


图 8−10　设置变量 w 名称

10）单击软件右侧图形菜单按钮查看变量的取值范围，弹出新窗口，如图 8−11 所示，选择“Deform Geometry by Custom Groups” > “h”或者“w”，通过调整“P”上的滑块查看模型的变换范围，记录 h 和 w 的变换范围，作为优化过程中变量设置的参考范围。单击“OK”按钮确认操作。

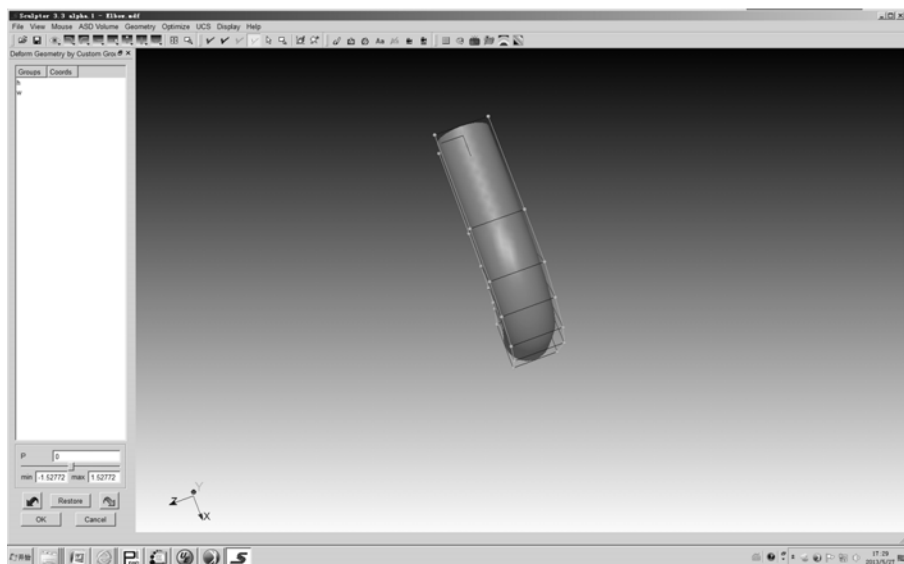


图 8−11　查看变量的范围

11）编写.def 文件，新建.txt 文件，重新命名为 elbow.def。打开新件文件编辑内容如图 8−12 所示。



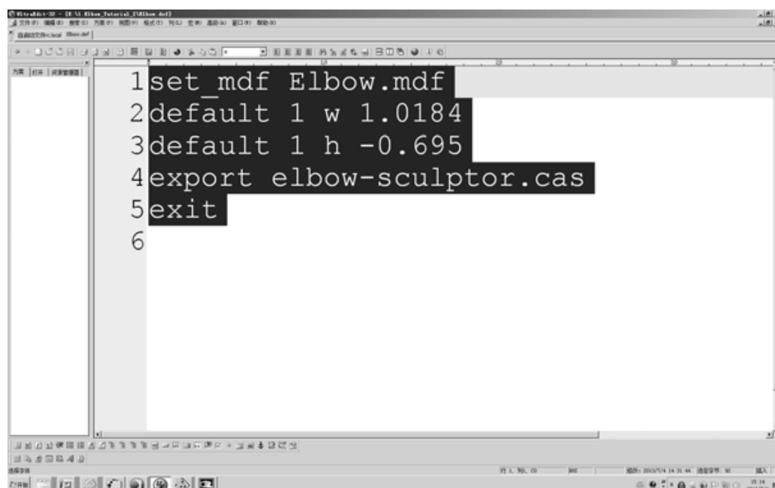


图 8-12 编写.def 文件

12）编写批处理文件，新建“.txt”文件，重新命名为“elbow_sculptor.bat”，文件内容如图 8-13 所示。



图 8-13 Sculptor 软件批处理文件

8.2.2 ICEM 对网格进行处理

1）启动 ICEM 软件，选择菜单“file”>“Reply Scripts”>“Recording scripts”，启动录制宏文件，将 Sculptor 保存变形后的网格模型导入到 ICEM 软件中，如图 8-14 所示。

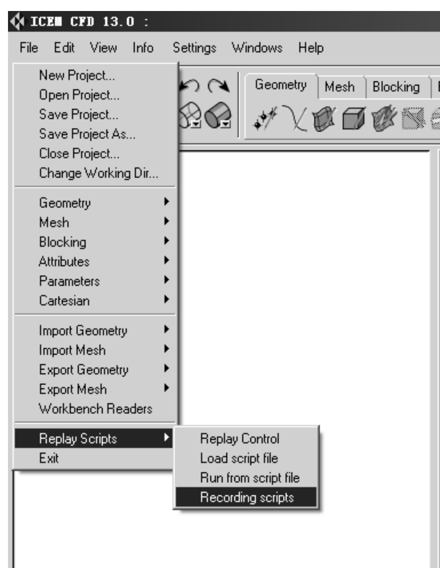


图 8-14 启动 ICEM 录制宏文件

2）选择菜单栏“File”>“Import Mesh”>“From Fluent”命令，打开文件“elbow.cas”，读取网格，如图8-15所示。

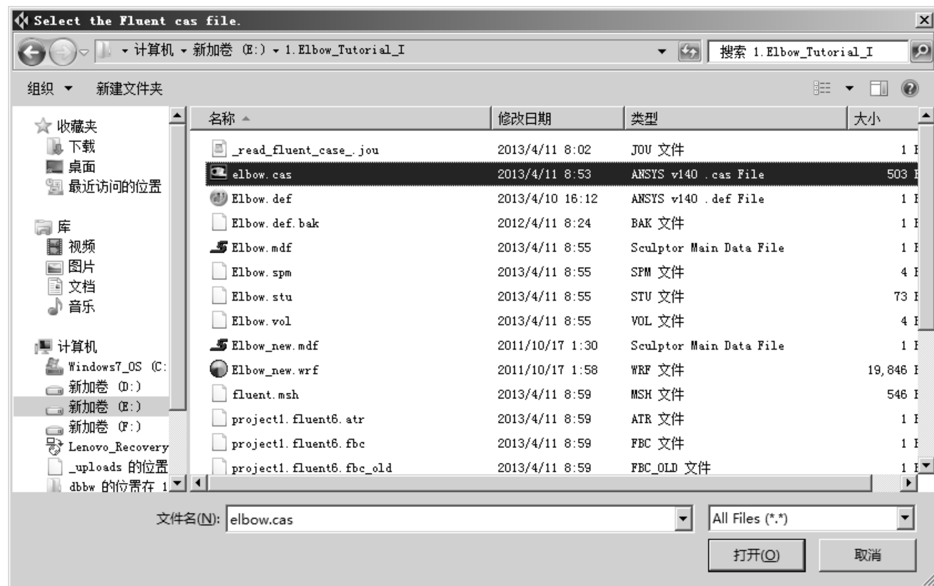


图8-15 读取“elbow.cas”文件

3）单击按钮保存文件，弹出“Save Project As”对话框，输入文件名为“project1.prj”，单击“保存”按钮确认操作，如图8-16所示。

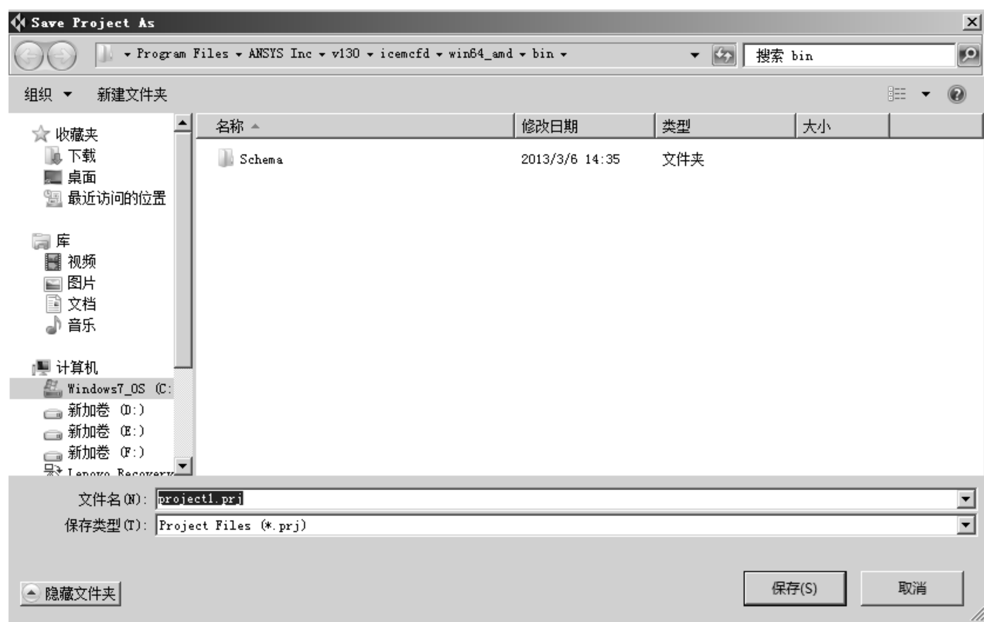


图8-16 保存网格文件

4）单击“Output”按钮，再单击按钮，树形对话框下方出现“Output Solver”栏，选

择“FluentV6”，单击“Apply”按钮确认操作，如图 8-17 所示。

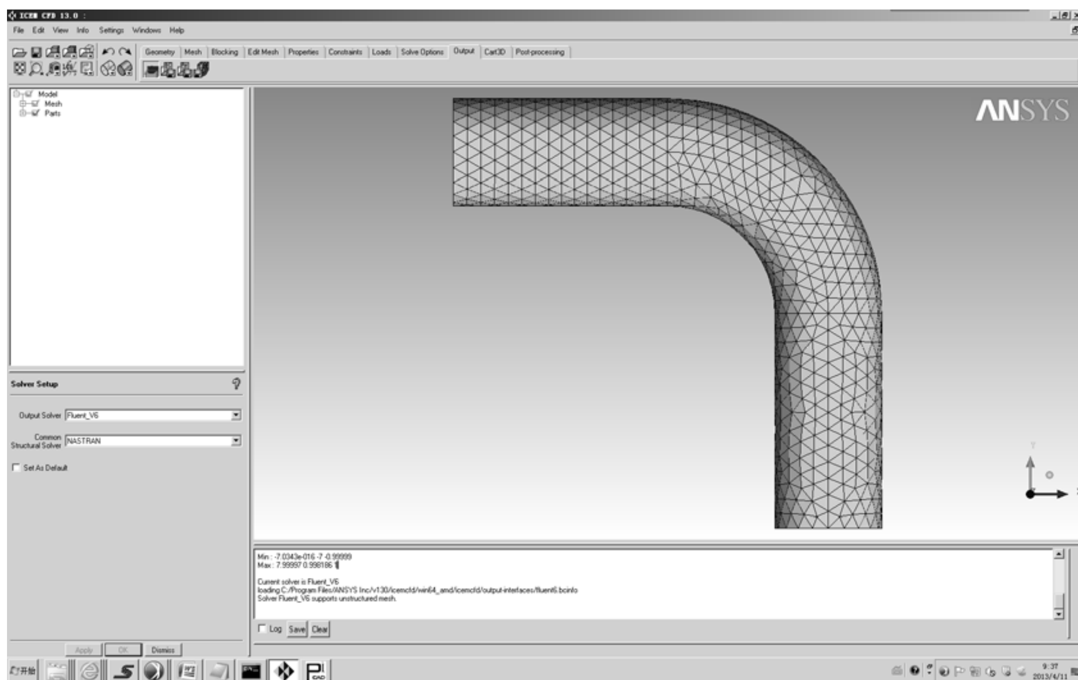


图 8-17　选择网格输出格式

5）选择工具栏“Output”>“Solver Setup”选项（按钮），弹出“另存为”对话框，单击“Yes”按钮确认保存，如图 8-18 所示。





图 8-18　保存计算文件

6）选择打开对应的“Preject1.uns”文件，如图 8-19 所示。



图 8-19 打开对应的“Preject1.uns”文件

7）打开对应的“Preject1.uns”文件后，弹出“Fluent V6”对话框，其他都采用默认值。“Output file”可以采用默认值或者命名为“elbow”，单击“Done”按钮确认操作，如图 8-20 所示。弹出“Message” 对话框，单击“Yes”按钮确认操作。

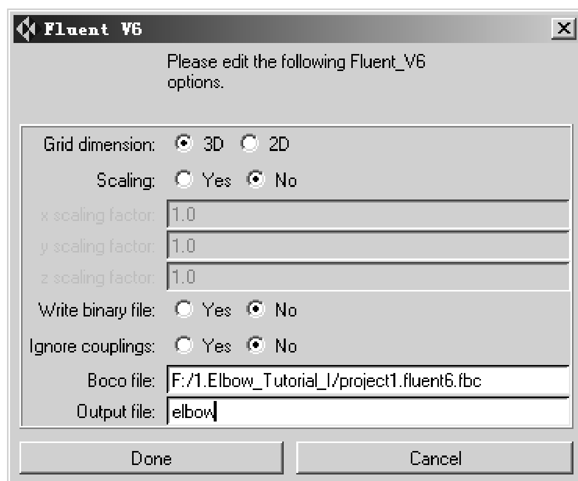


图 8-20 输出 mesh 文件

8）选择菜单栏“File”>“Exit”，弹出“Save”对话框，单击“Yes”按钮，保存文件并退出 ICEM 软件。

9）编写批处理文件，新建“.txt”文件，重新命名为“ICEM Mesh.bat”，文件内容如图 8-21 所示。

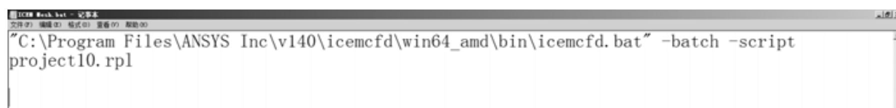


图 8-21　ICEM 批处理文件

8.2.3 流体计算软件 FLUENT 对弯管进行计算

1）通过“开始”菜单启动 FLUENT 软件，在“FLUENT Launcher”对话框中选择“3D”三维计算模式，激活“Double Precision”双精度模式，选择“Parallel（Local Machine）”选项，在“Number of Processes”中选择“8”，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-22 所示。

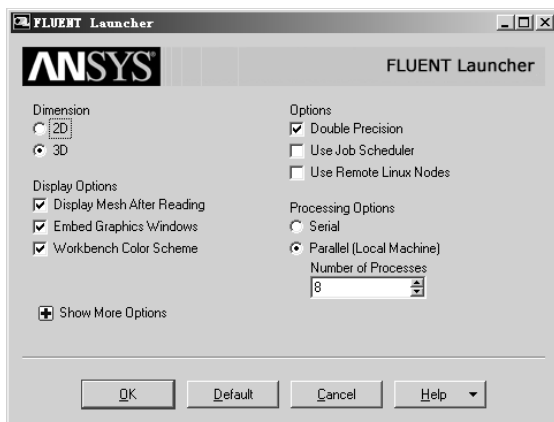


图 8-22　打开 FLUENT 软件

2）选择菜单栏“File”>“Journal…”，如图 8-23 所示，弹出 “Select File” 对话框。将“Journal File”命名为“elbow”，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-24 所示。

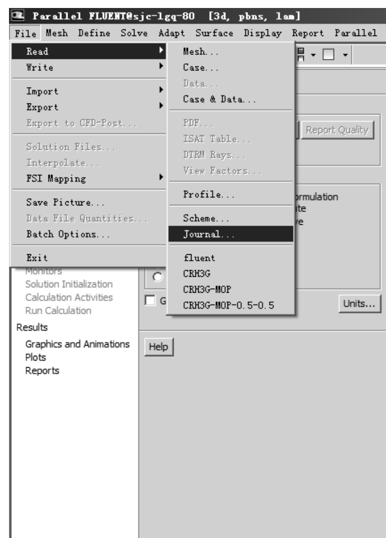


图 8-23　打开宏文件录制

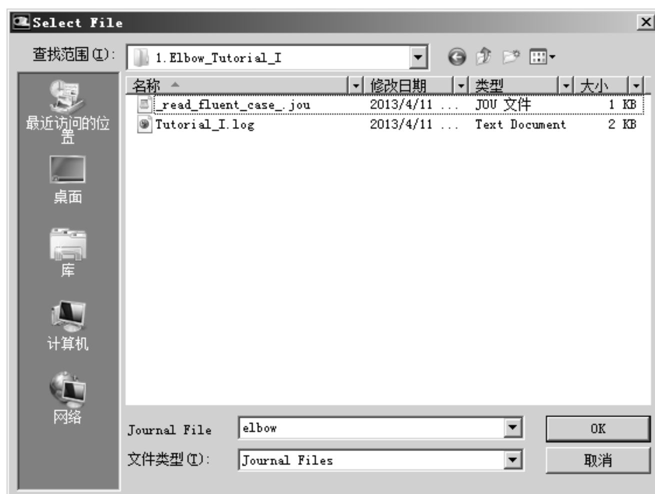


图 8-24　宏文件命名为“elbow”

3）选择菜单栏“File”>“Case…”，打开文件 fluent.msh，读取变形后的网格文件，如图 8-25 所示，单击“OK”按钮确认操作。

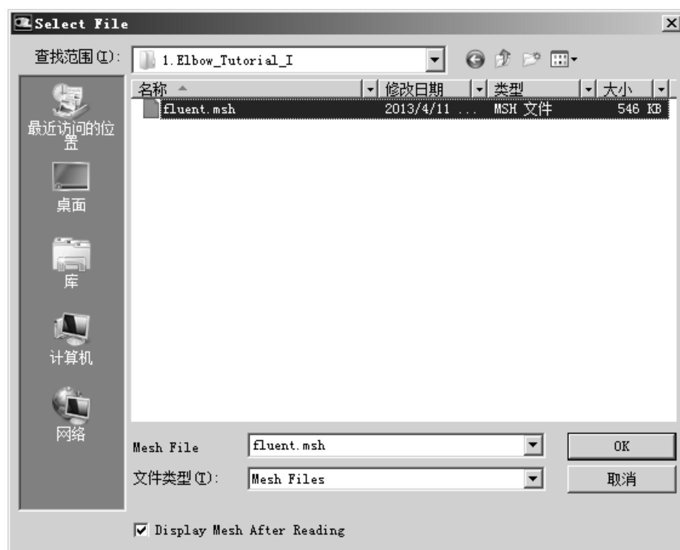


图 8-25　读入网格文件

4）默认选择“Problem Setup”>“General”项属性栏中的各项设置。选择“Problem Setup”>“Models”项，双击其属性栏中的“Viscous-Laminar”项，更换流体计算模型，如图 8-26 所示。

5）在打开的“Viscous Model”对话框中，默认为“Laminar”层流选项，如图 8-27 所示。

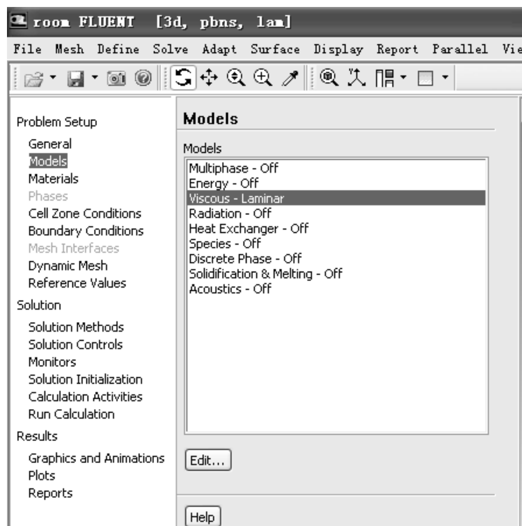


图 8-26　更换流体计算模型

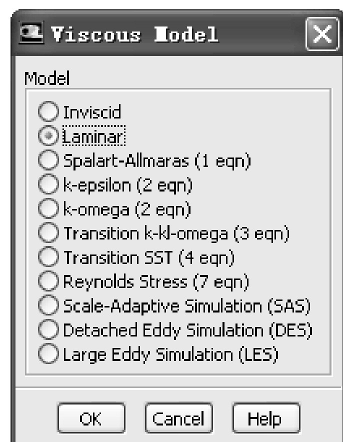


图 8-27　“Viscous Model”对话框

6）选择“k-epsilon（2 eqn）”项，对话框展开为图 8-28 所示的形式。单击“OK”按钮，确认选择。

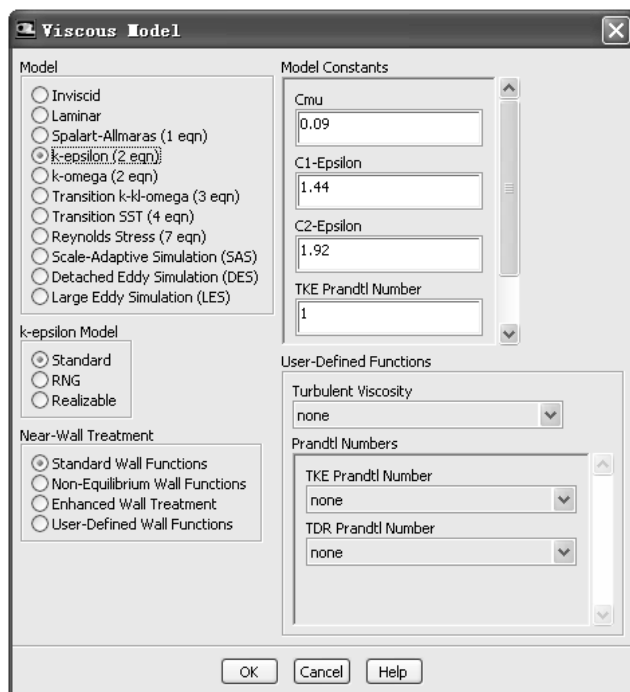


图 8-28　选择“k-epsilon(2 eqn)”项

7）双击“Problem Setup”>“Models”项属性栏中的“Radiation-Off”项，弹出“Radiation Model”对话框，如图 8-29 所示。

8）选择“Solar Load”栏下的“Solar Ray Tracing”项，对话框展开为图 8-30 所示的形式。

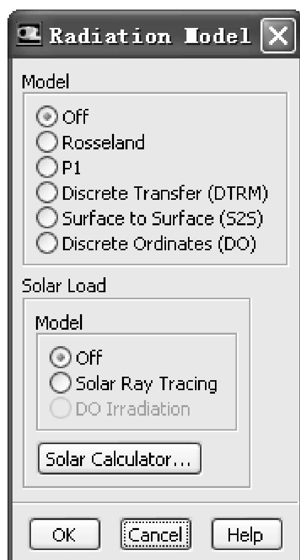


图 8-29　“Radiation Model”对话框

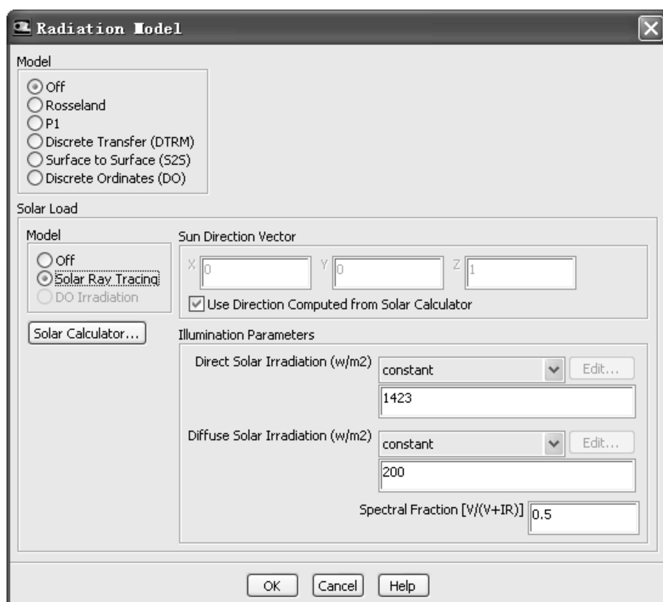


图 8-30　选择“Solar Ray Tracing”项

9）保持默认设置，单击“OK”按钮退出。

10）保持“Problem Setup”>“Materials”和“Problem Setup”>“Cell Zone Conditions”两项属性栏设置不变。选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“inlet”边界，软件默认其为“velocity-inlet”条件。单击“Edit...”按钮，在弹出的“Velocity Inlet”对话框中，输入速度值为“3”，如图 8-31 所示。单击“OK”按钮退出。

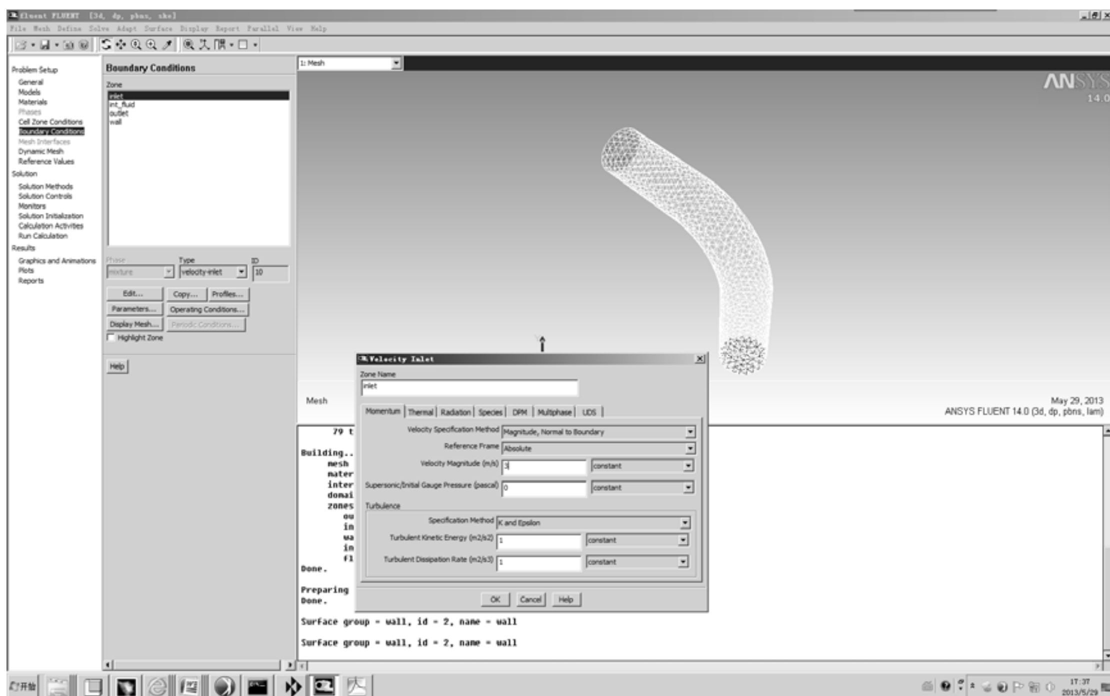


图 8-31　设置边界条件

11）选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“outlet”边界，将“velocity-inlet”条件更改为“Outflow”条件。在图 8-32 所示的对话框中单击“Yes”按钮，然后在图 8-33 所示的“Outflow”对话框中单击“OK”按钮，保持默认设置。

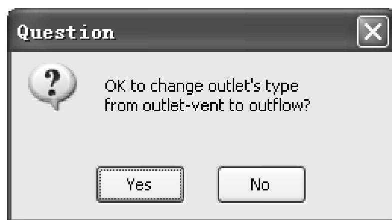


图 8-32　改变出口条件

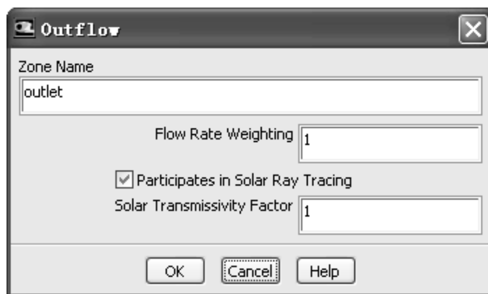


图 8-33　设置出口条件

12）选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”> “wall”，默认其为“wall”边界，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-34 所示。

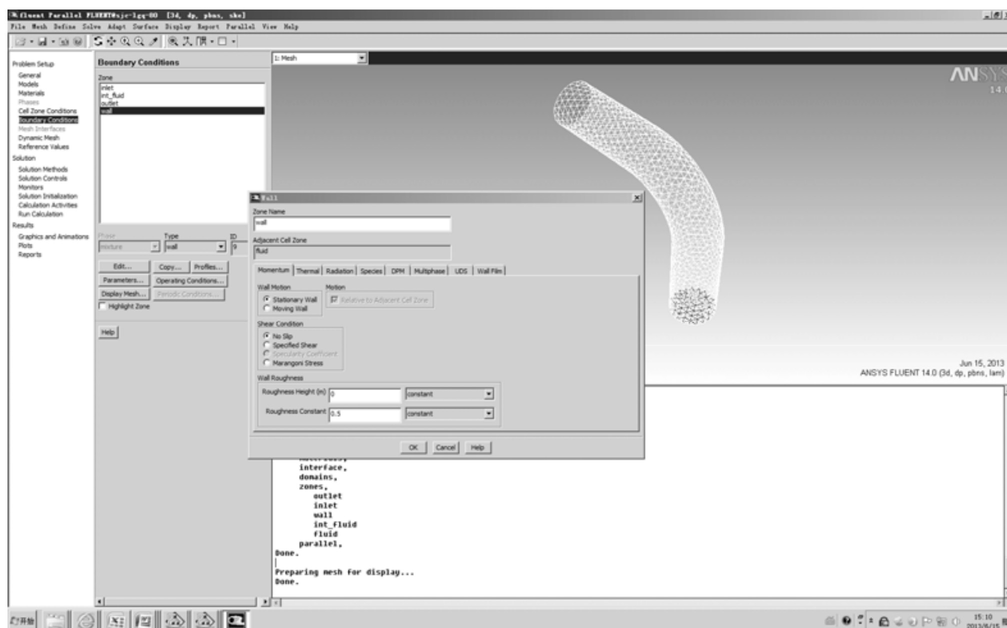


图 8-34　设置管壁面边界为 wall

13）选择“Solution”>“Solution Methods”和“Solution”>“Solution Controls”两项设置不变。

选择“Solution”>“Monitors”项后双击“Residuals”项，打开“Residual Monitor”对话框。将“Equations”栏所有项的“Absolute Criteria”（收敛标准）由 0.001 修改为 0.0001，如图 8-35 所示。

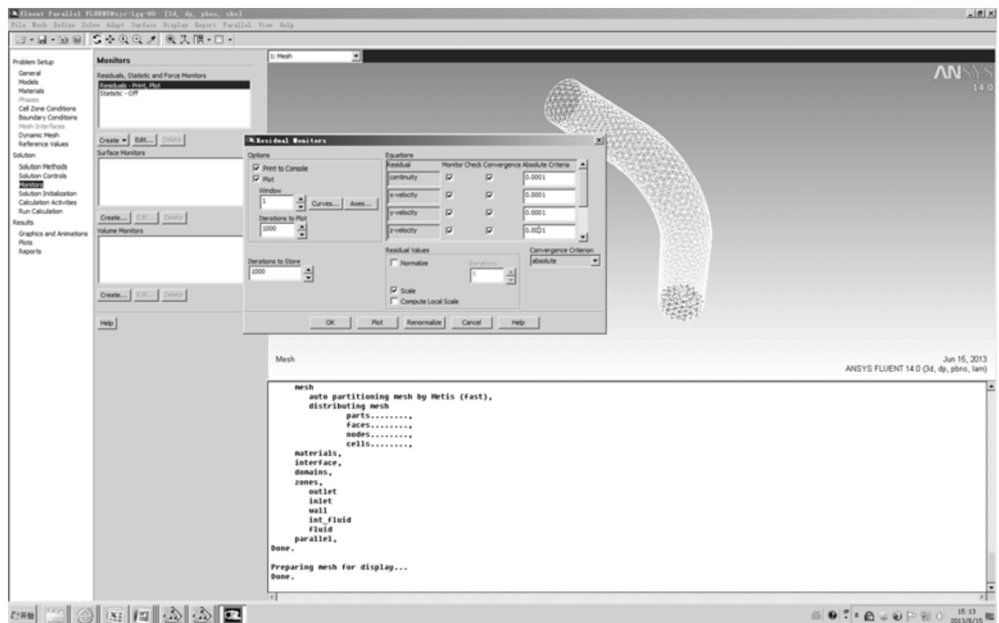


图 8-35　修改收敛标准

14）选择“Solution”>“Solution Initialization”项，将其属性栏“Compute from”项设置为“inlet”边界，其余设置不变，如图 8-36 所示。

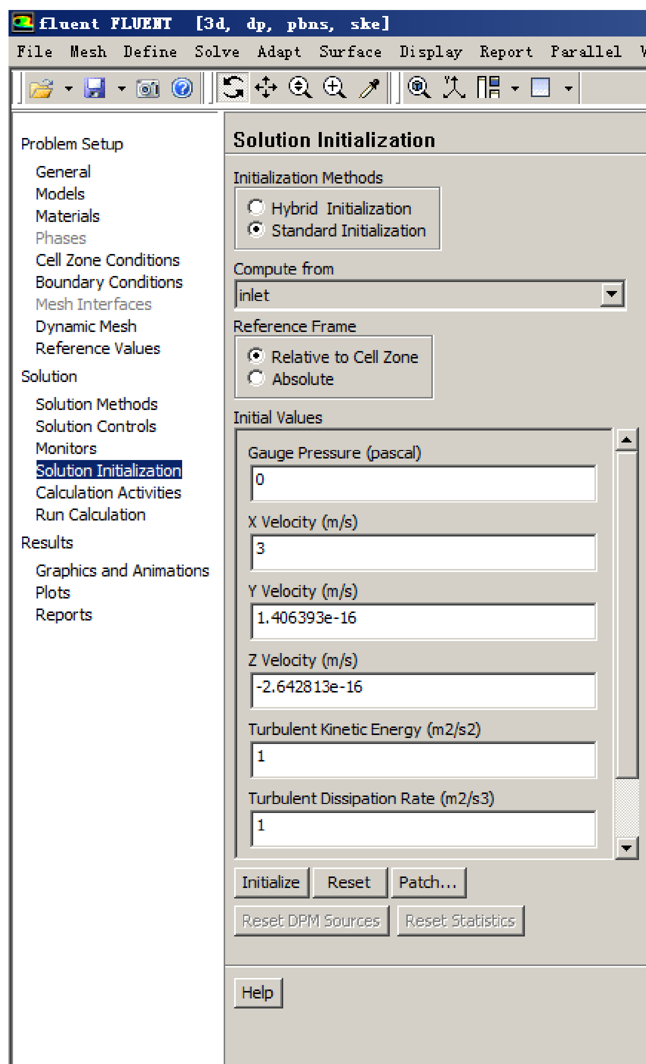


图 8-36 初始化计算项目

单击“Initialize”按钮，对计算进行初始化。

15）保持“Solution”>“Calculation Activities”项设置不变。

16）设置迭代步数。选择“Solution”>“Run Calculation”项，将其属性栏中“Number of Iterations”项设置为“5”，如图 8-37 所示。

单击“Calculate”按钮，开始计算。

计算完成后，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-38 所示。

注意：此处仅作简单设置计算，具体计算步骤数将在后文进行修改。



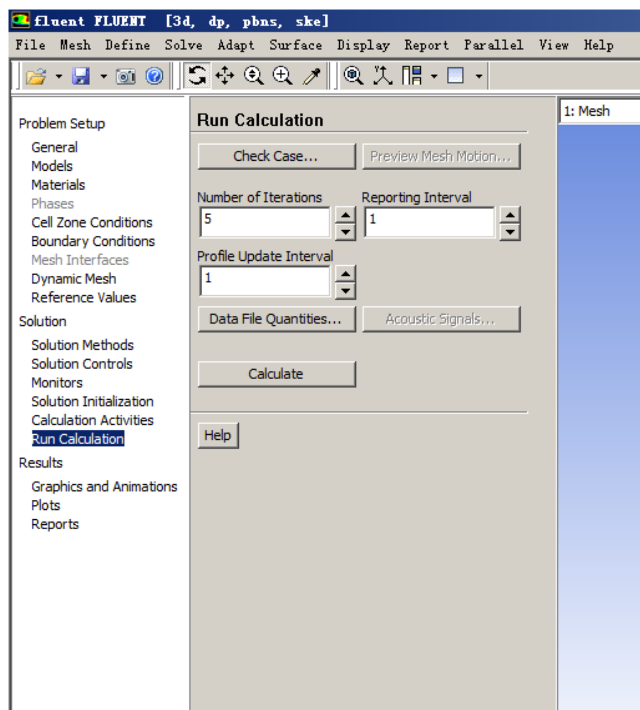


图 8-37　设置迭代步数

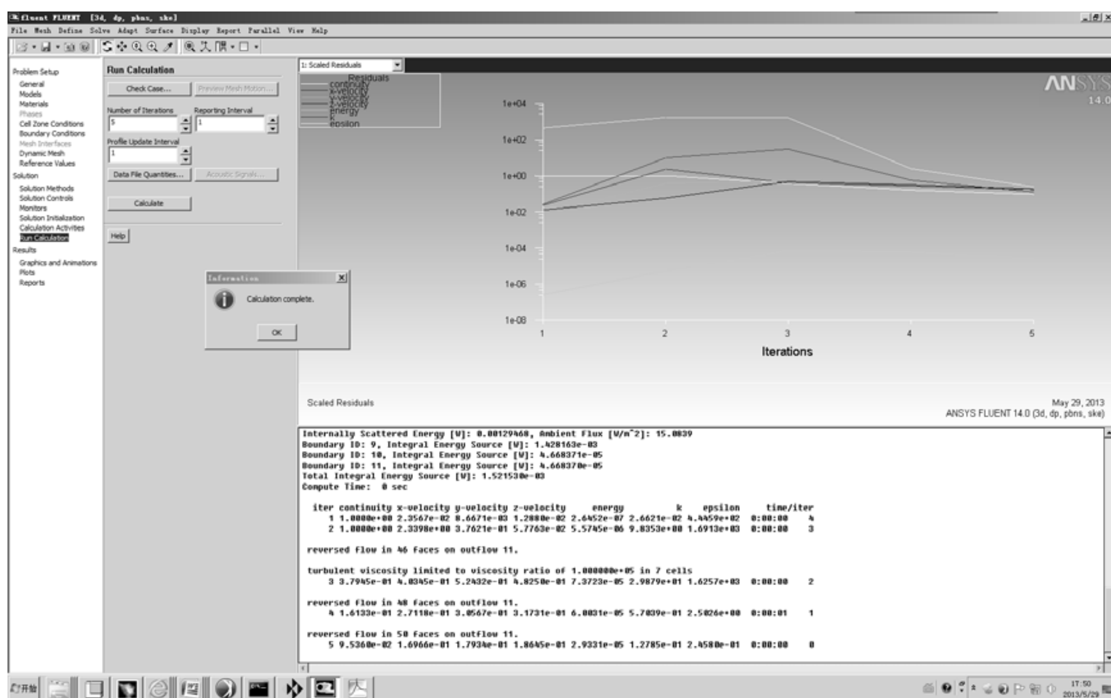


图 8-38　残差曲线图

17）选择树形菜单栏“Results”>“Reports” >“Surface Integrals”，弹出“Surface Integrals”对话框（见图 8-39），依次选择“Report Type”>“Facet Average”，“Field Variable”> “Pressure…”>“Static Pressure”和“Surfaces”>“inlet”，单击“Write…”按钮，弹出“Select File”对话框。

在“Surface Report”处输入文件名“inlet-p”，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-40 所示。

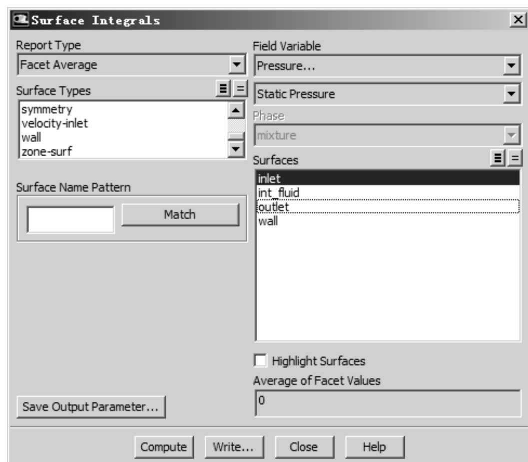


图 8-39 “Surface Integrals”对话框



图 8-40 输出“inlet”压力结果文件

18）在“Surface Integrals”对话框中，选择“Report Type”>“Facet Average”，依次选择“Field Variable”>“Pressure…”>“Static Pressure”，“Surfaces”>“outlet”（见图 8-41）。单击“Write…”按钮，弹出“Select File”对话框，在“Surface Report”处输入文件名“outlet-p”，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-42 所示。

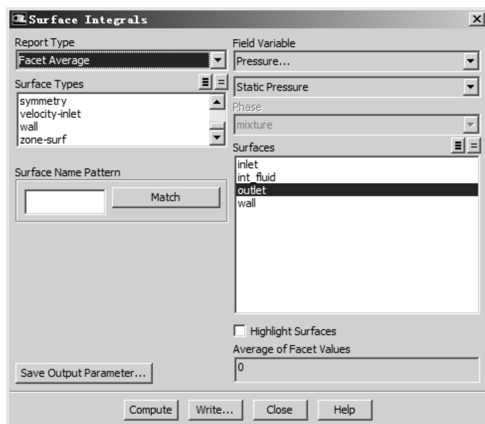


图 8-41 修改输出项



图 8-42 输出“outlet”压力结果文件

19）编写批处理文件，新建“.txt”文件，重新命名为“Elbow-fluent.bat”，文件内容如图 8-43 所示。

```
del inlet-p.dat
del outlet-p.dat
del elbow-sculptor.cas
"D:\Program Files\ANSYS Inc\v140\fluent\ntbin\win64\fluent.exe"  3d -t8
-i Eblow.jou
```

图 8-43　fluent 批处理文件

8.2.4 Isight 软件对各软件进行集成

1）启动 Isight 软件，选择“开始”菜单栏“Isight5.5”>“Design Gateway”命令，打开 Isight5.5 软件，任务窗口默认任务“Tsak1”，如图 8-44 所示。

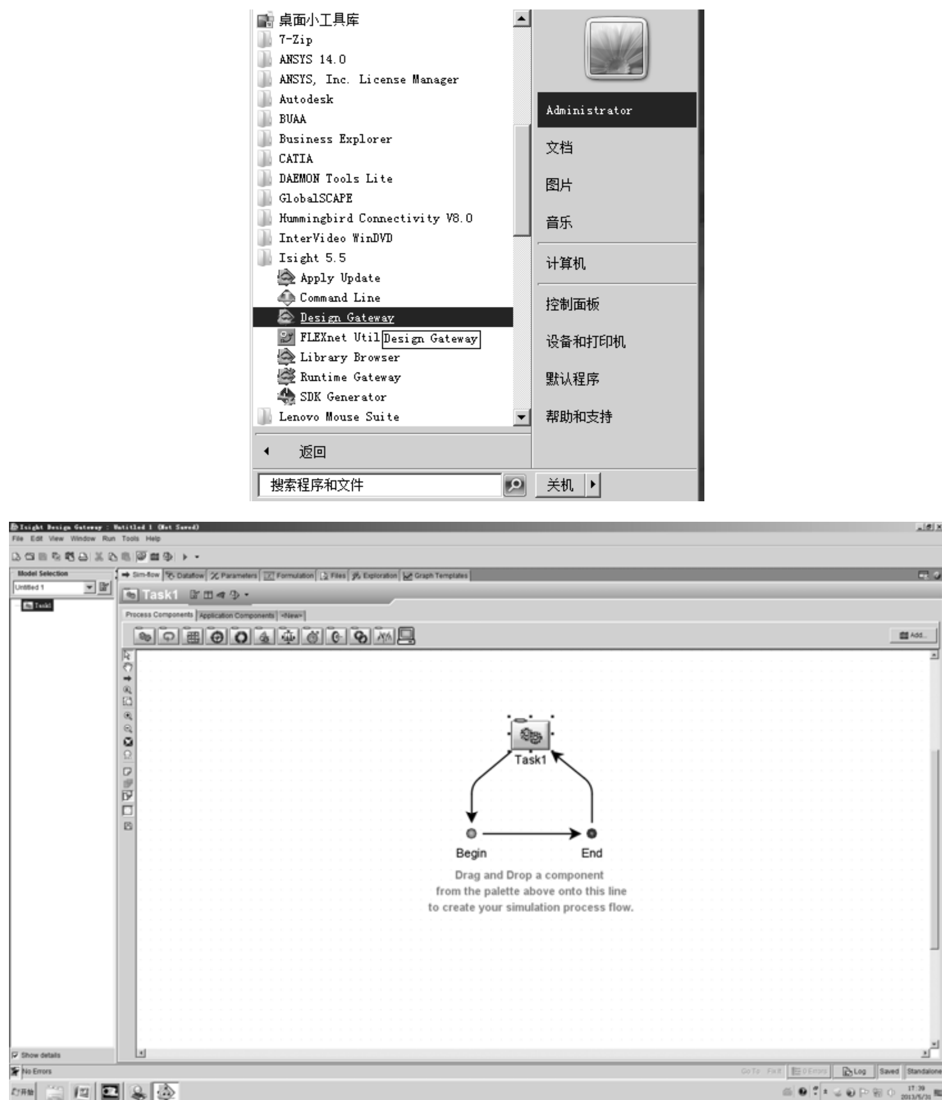


图 8-44　启动优化软件 Isight

2）选择任务窗口“Sim-flow”>“Application Components”，选择 Simcode 组件，将组件拖曳至“Task1”中，如图 8-45 所示。

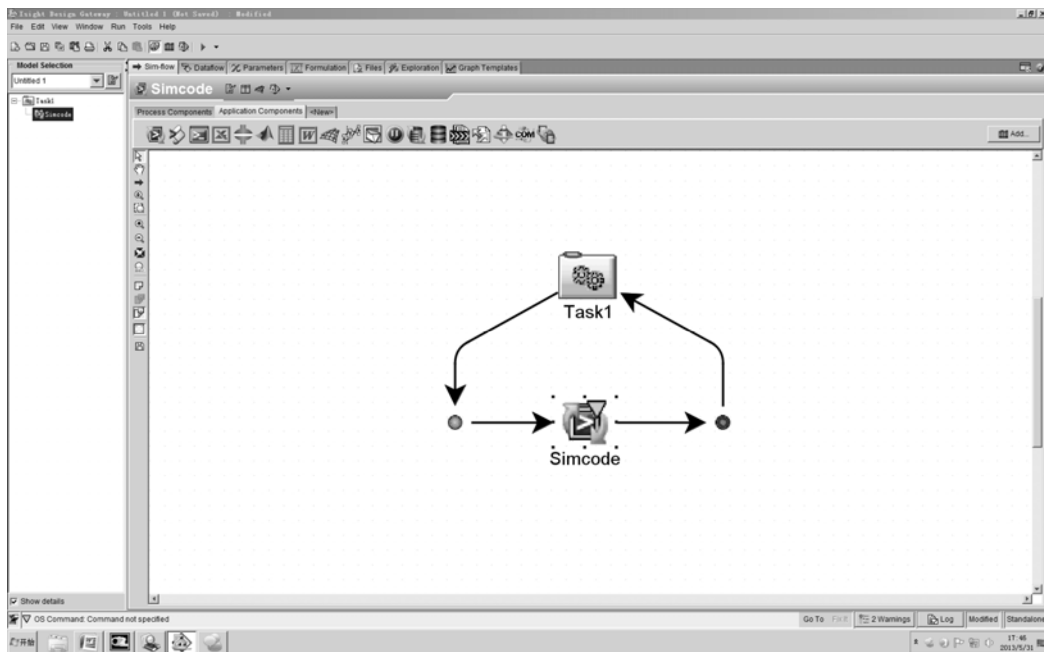


图 8-45　创建 Simcode 工作流

3）右键单击“Simcode”组件，选中“Rename”（见图 8-46），弹出“Rename Component”对话框，在对话框中输入“sculptor”，单击“确定”按钮确认操作，如图 8-47 所示。

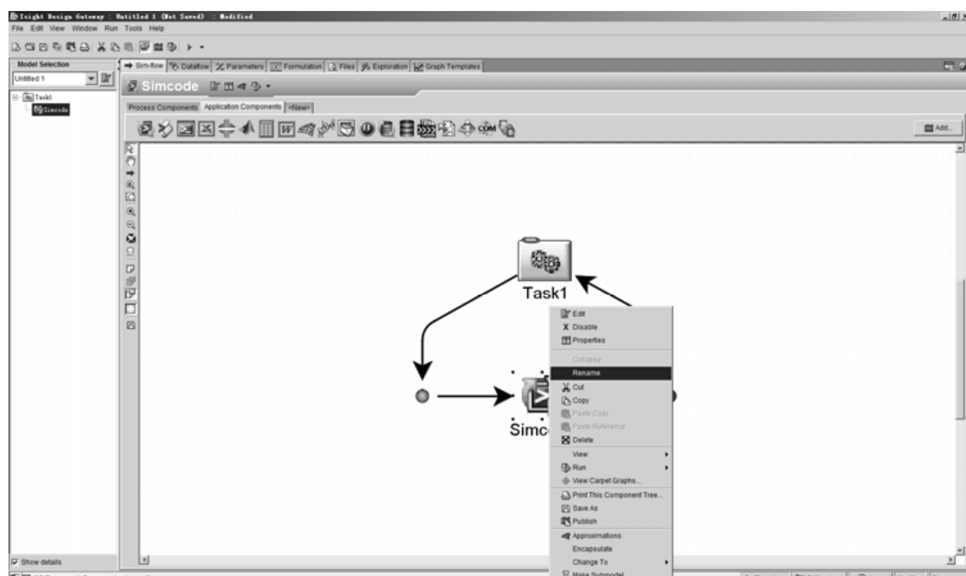


图 8-46　Rename 命令



图 8-47 “Simcode”命名为“sculptor”

4）双击“sculptor”组件，弹出“Component Editor-Simcode”对话框（见图 8-48），选择“Command”>“Basic”>“Find Program…”，弹出 “Select Program”对话框，选择文件“elbow_sculptor.bat”，单击“打开”按钮确认操作，如图 8-49 所示。

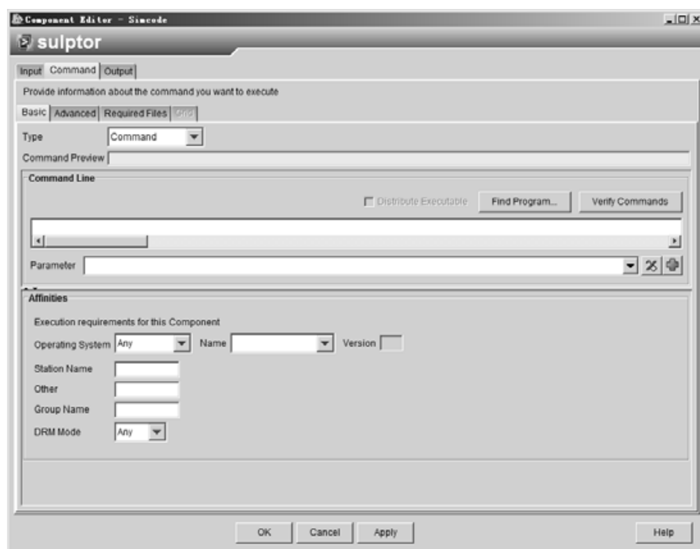


图 8-48 Component Editor-Simcode”对话框

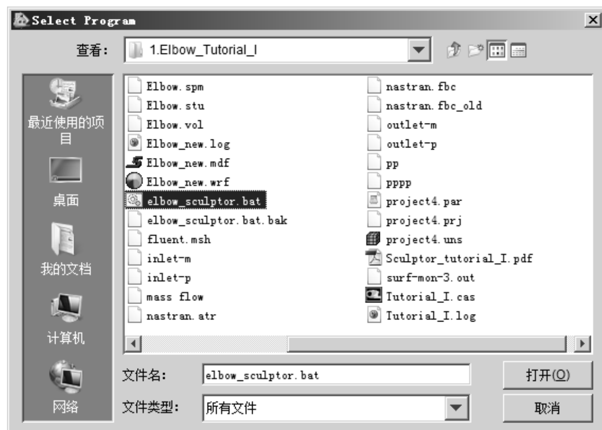


图 8-49 打开“sculptor”启动文件

5）单击“Advanced”按钮，将“Execution takes longer than”前的☑勾选掉，如图 8-50 所示。

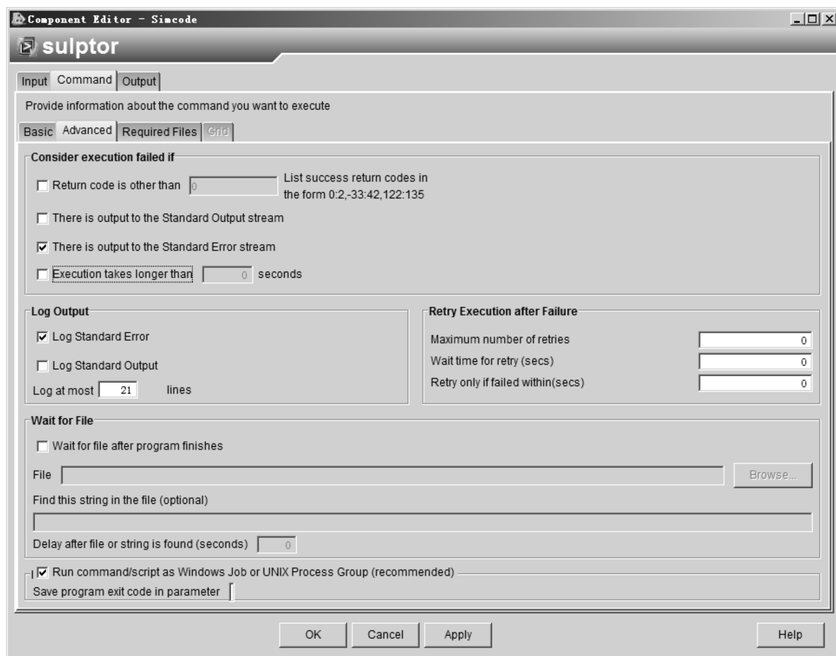


图 8-50　取消计算限制时间

6）切换到“Input”属性按钮，在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”按钮，弹出对话框“Exchanger Wizard”默认选项，如图 8-51 所示。

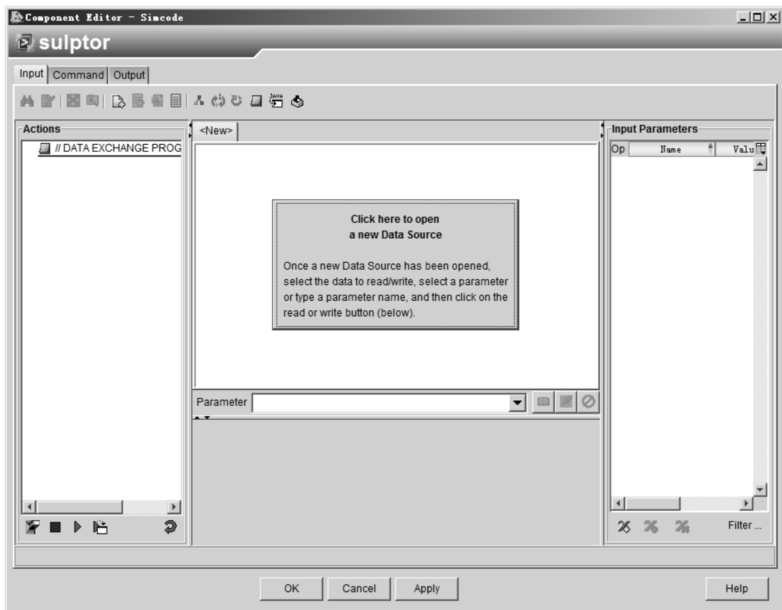


图 8-51　Simcode Input 编辑对话框

7）在弹出的“Select Data Source”对话框中，选择“Update a template file”选项，单击“Next”按钮进行下一步，如图 8-52 所示。



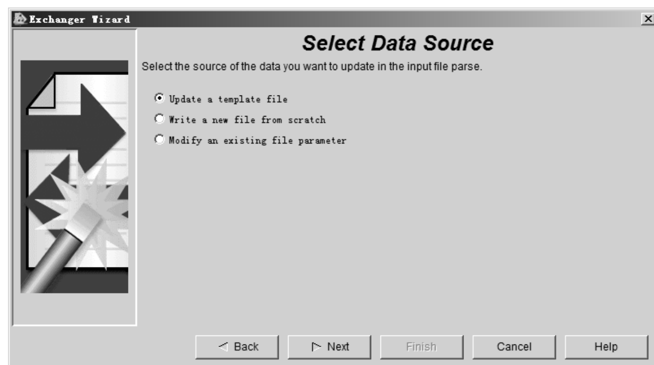


图 8-52 Update a template file 单选项

8）在弹出的“Select Template File”对话框中单击“Browse”按钮，选择“Elbow.def”，单击“打开”按钮确认操作。单击“Next”按钮，如图 8-53 所示。

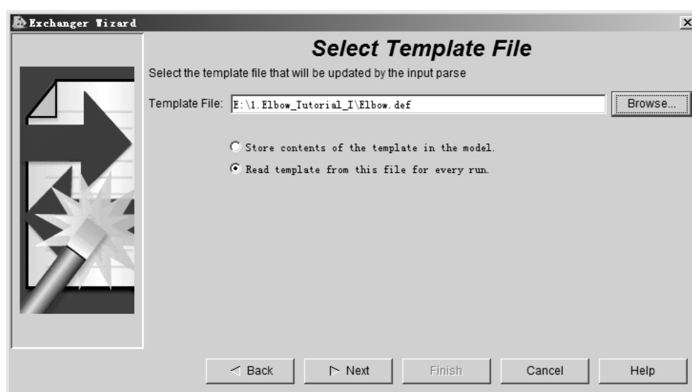


图 8-53 选择写入文件

9）在弹出的“Select Local File Name”对话框中继续单击“Next”按钮，如图 8-54 所示。



图 8-54 “Select Local File Name”对话框

10）在弹出的“File Format”对话框中选择“General Text”选项，如图 8-55 所示。单击“Finish”按钮，返回“Component Editor”对话框。

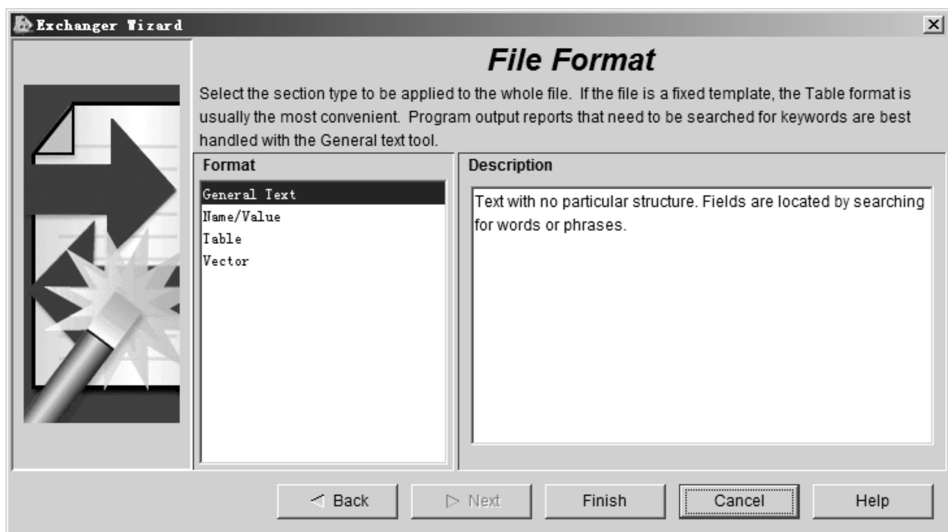


图 8-55 “File Format”对话框

11）单击“Elbow.def”数据区中的第二行显示“0.0”字符串，在“Parameter”文本框后输入名称“h”参数名，单击 “写入”按钮，此时“0.0”背景变为粉红色。左侧“Actions”和右侧“Input Parameters”分别显示，如图 8-56 所示。

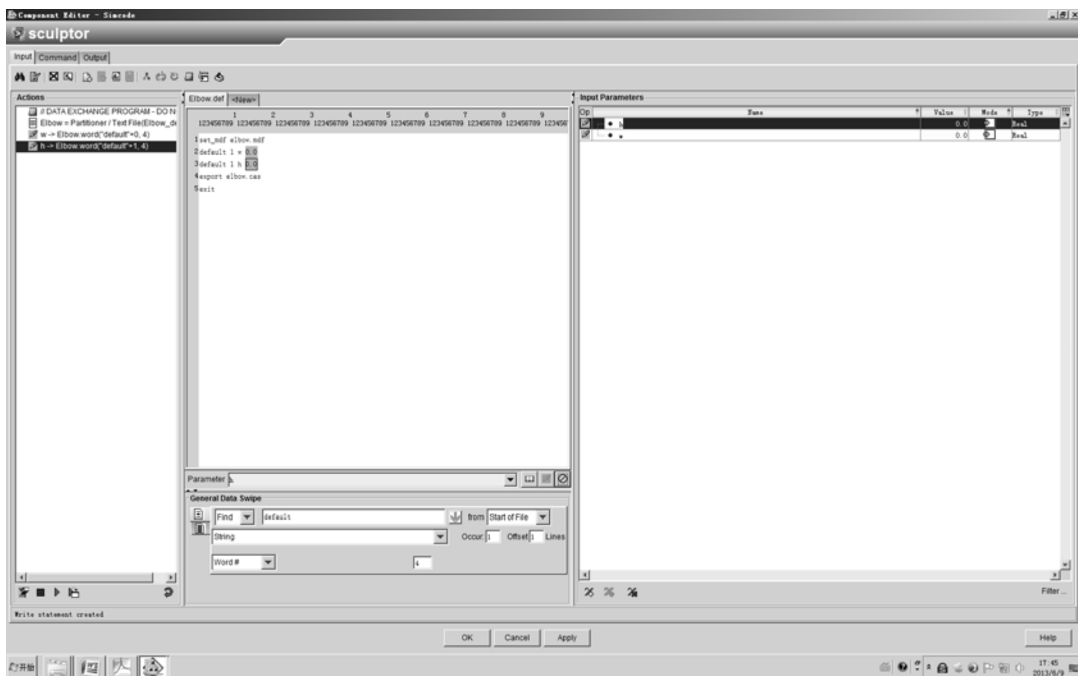


图 8-56 定义变量 h 对话框

12）单击“Elbow.def”数据区中的第二行显示“0.0”字符串，在“Parameter”文本框后输入名称“w”参数名，单击“写入”按钮，此时“0.0”背景变为粉红色。左侧“Actions”和右侧“Input Parameters”分别显示，如图 8-57 所示。单击“OK”按钮，完成变量命名。

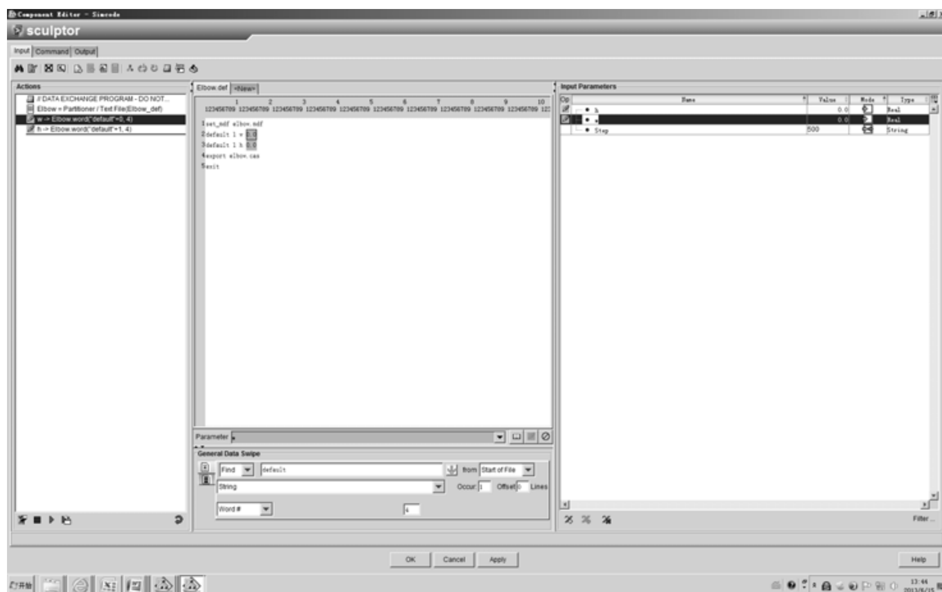


图 8-57 定义变量 w 对话框

13）选择任务窗口“Sim-flow”>“Application Components”，选择 Simcode 组件，将按钮拖曳至“Task1”中，如图 8-58 所示，右键选中“Simcode”后再选中“Rename”，弹出“Rename Component”对话框，在对话框中输入“ICEM”，单击“OK”按钮确认操作。

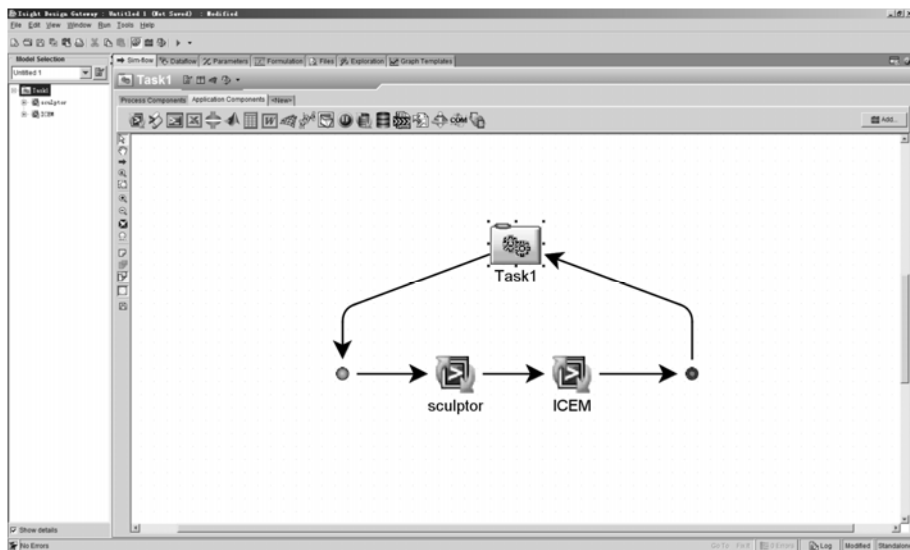


图 8-58 创建 ICEM 流程

14）双击“ICEM”组件，弹出“Component Editer-Simcode”对话框（见图 8-59），选择对话框中的“Command”>“Basic”>“Find Program…”，弹出“Select Program”对话框，选择文件“ICEM Mesh.bat”，单击“打开”按钮确认操作，如图 8-60 所示。

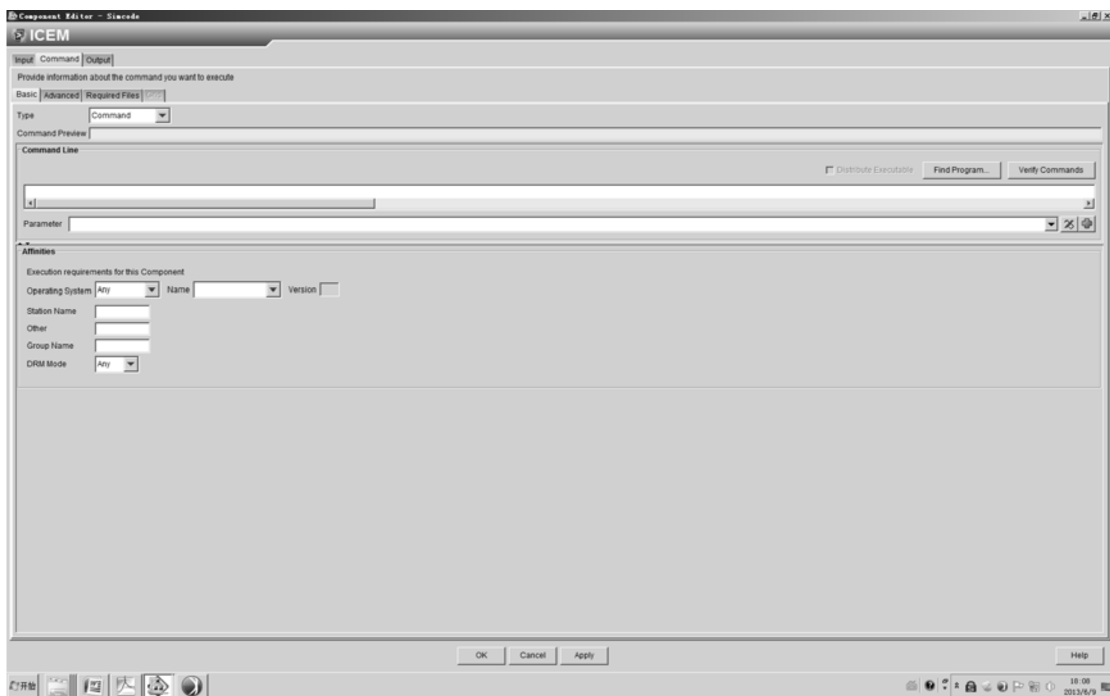


图 8-59 Component Editer-Simcode”对话框

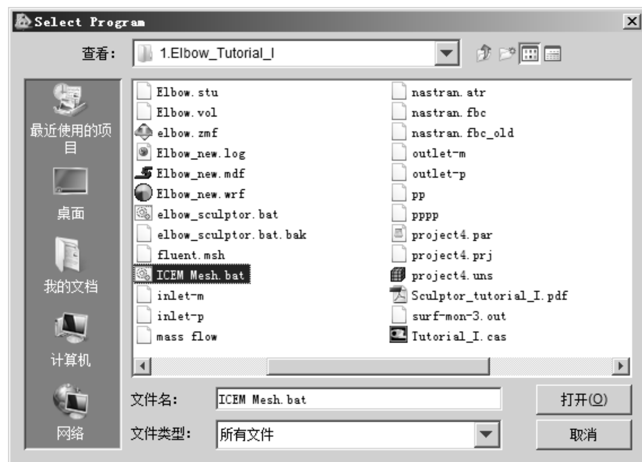


图 8-60 读入 ICEM 启动文件

15）切换到“Command”属性窗口，单击“Advanced”按钮，将“Execution takes longer than”前的☑勾选掉，如图 8-61 所示。

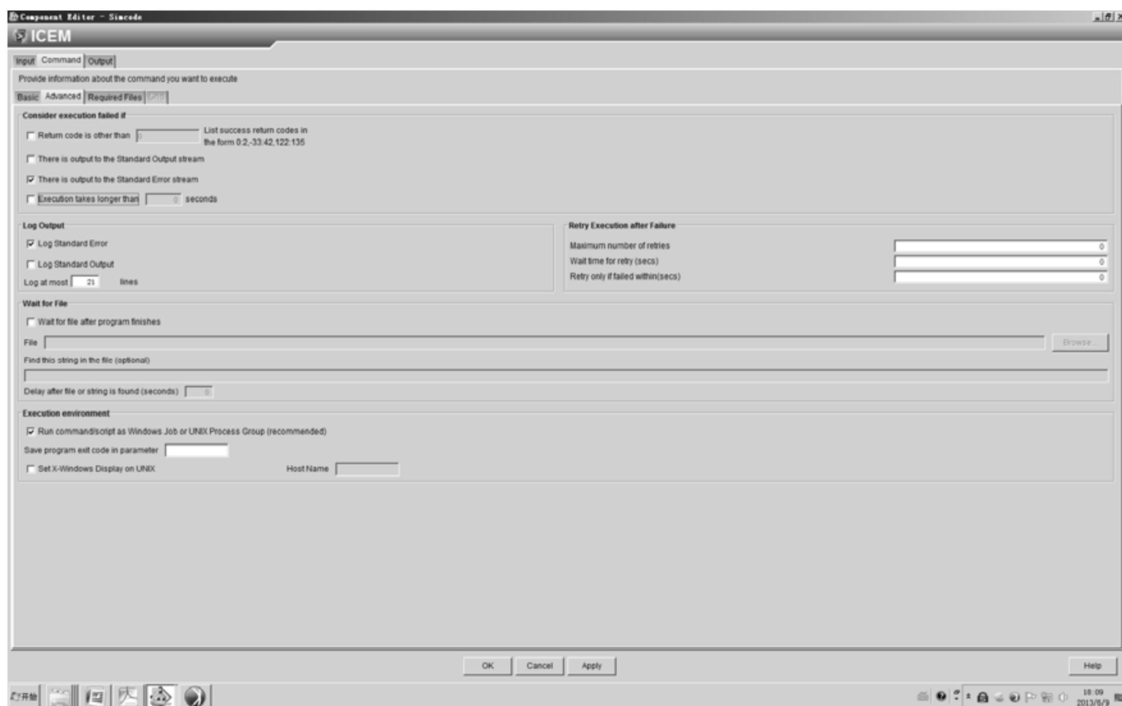


图 8-61　取消计算限制时间

16）切换到“Input”属性窗口，在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”，弹出“Exchanger Wizard”对话框默认选项（见图 8-62），单击“Next”按钮进行下一步，单击“Browse”按钮后选择“Elbow.def”，接着单击“打开”按钮确认操作，如图 8-63 所示。

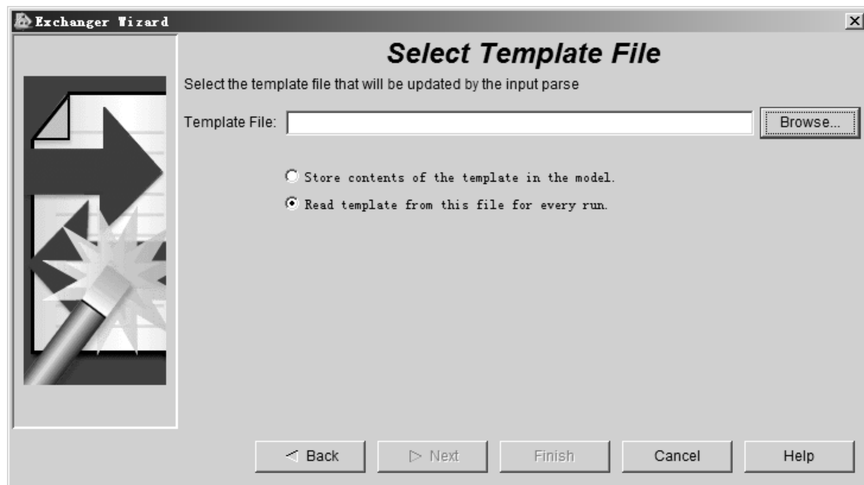


图 8-62　Exchanger Wizard 对话框

图 8-63　写入 ICEM 宏文件

17）单击“Next”按钮，默认所有选项，单击“Finish”按钮结束操作。读入后的 ICEM 宏文件如图 8-64 所示。

图 8-64　读入后的 ICEM 宏文件

18）选择任务窗口“Sim-flow”>“Application Components”，选择 Simcode 组件 ，将按钮拖曳至“Task1”中，右键选中“Simcode”后再选中“Rename”，弹出

“Rename Component”对话框，在对话框中输入“fluent”。单击“OK”按钮确认操作，如图 8-65 所示。

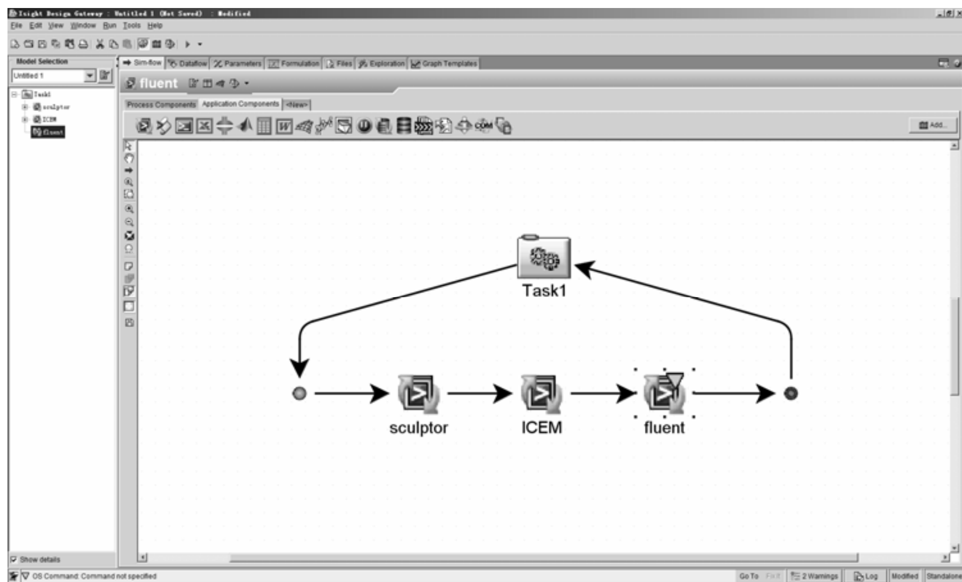


图 8-65 创建 fluent 流程图

19）双击“fluent”模块，弹出“Component Editer-Simcode”对话框，切换到“Command”属性窗口，选择对话框中的“Command”>“Basic”>“Find Program…”，弹出“Select Program”对话框，选择文件“Elbow-flunet.bat”，单击“打开”按钮确认操作，如图 8-66 所示。

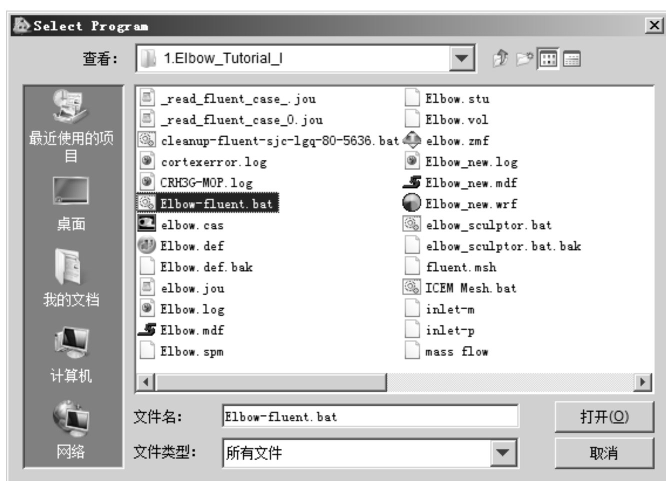


图 8-66 读入启动文件

单击“Advanced”按钮，将“Execution takes longer than”前的☑勾选掉，如图 8-67 所示。

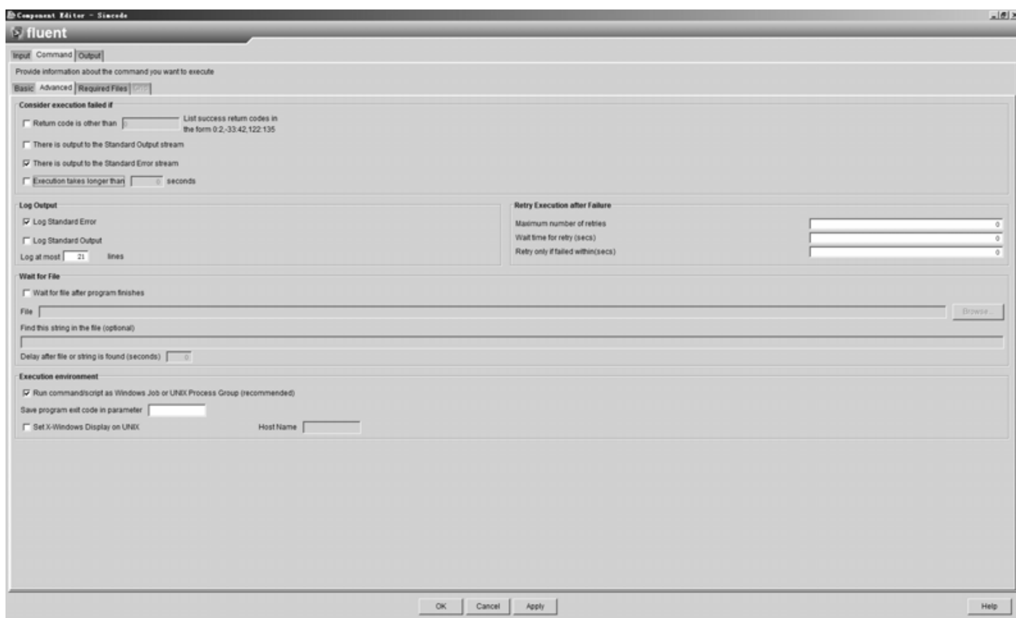


图 8-67　取消计算时间限制

20）切换到“Input”页“New”，在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”按钮，弹出“Exchanger Wizard”对话框，默认所有选项，单击“Next”按钮进行下一步，单击“Browse”按钮，选择“Elbow.jou”，单击“打开”按钮确认操作，如图 8-68 所示。

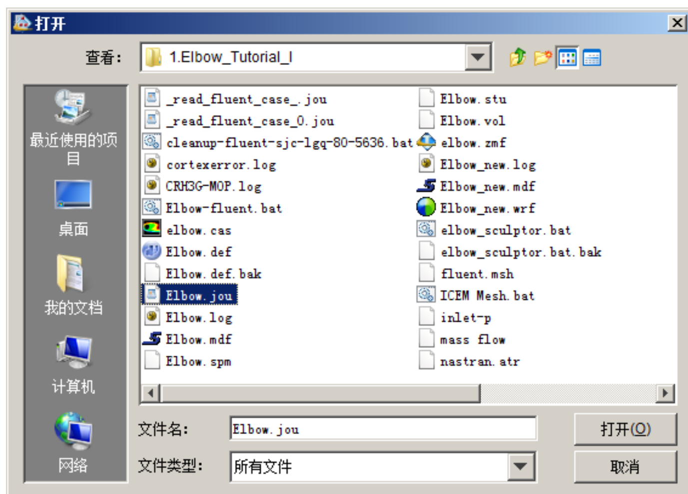


图 8-68　打开 fluent 宏文件

21）单击“Next”按钮，默认选项，单击“Finish”按钮结束操作，如图 8-69 所示。

22）单击“Elbow.jou”数据区中“Number of Iterations”后的“5”字符串，在“Parameter”文本框后输入名称“step”参数名，单击“写入”按钮，此时“5”背景变为

粉红色。左侧“Actions”和右侧“Input Parameters”分别显示，如图 8-70 所示。单击“OK”按钮，完成变量命名。

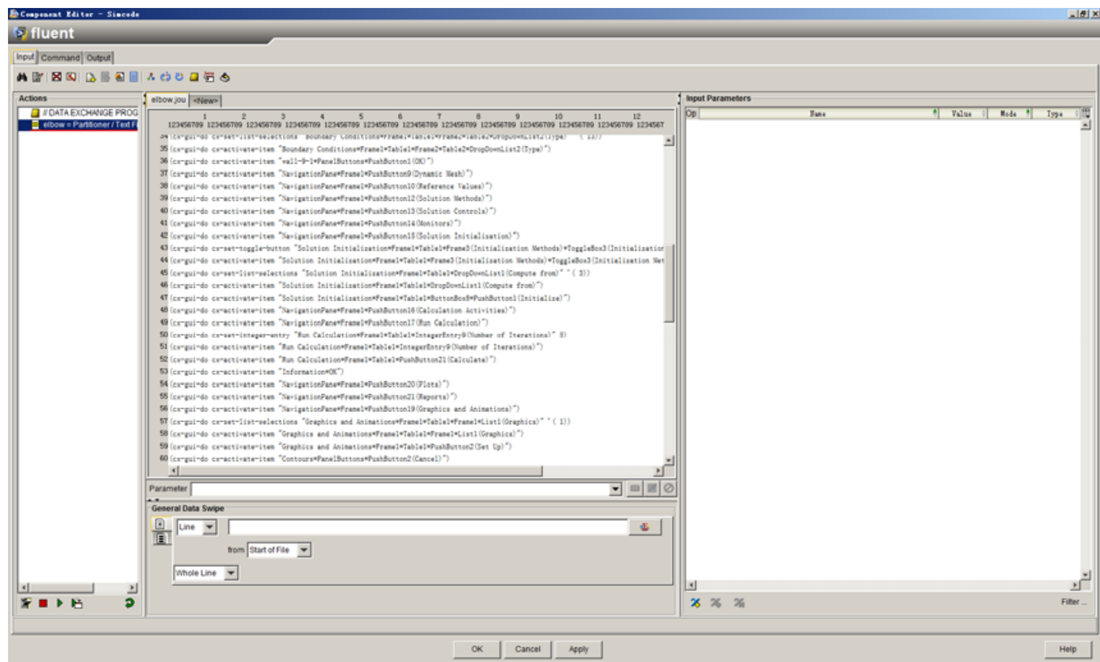


图 8-69　读入 fluent 宏文件

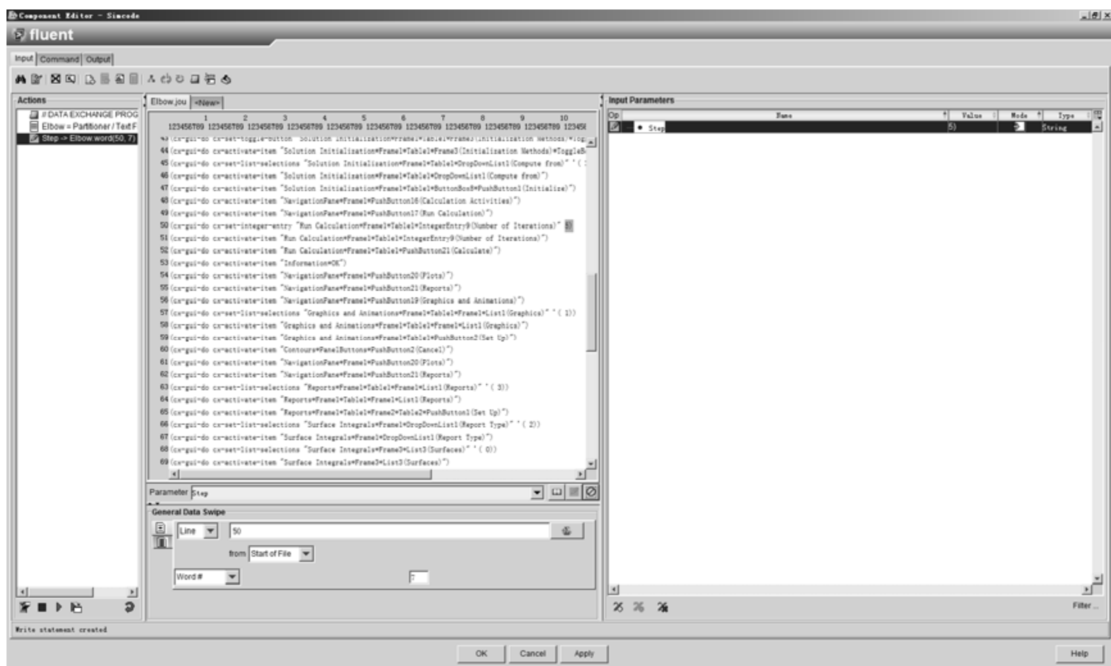


图 8-70　定义变量 fluent 计算步数

23）切换到“Output”属性窗口，在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”按钮，弹出“Exchanger Wizard”对话框，选择“Sample File”>“Browse…”后再选择“inlet-p”，单击“打开”按钮进行下一步，单击“Next”按钮，默认对话框中的选项，单击“Finish”按钮结束操作，如图 8-71 所示。



图 8-71　结果 inlet-p 输出对话框

24）单击“New”按钮，弹出“Exchanger Wizard”对话框，选择“Sample File”>“Browse…”后再选择“outlet-p”项，单击“打开”按钮进行下一步，单击“Next”按钮，默认对话框中的选项，单击“Finish”按钮结束操作，如图 8-72 所示。

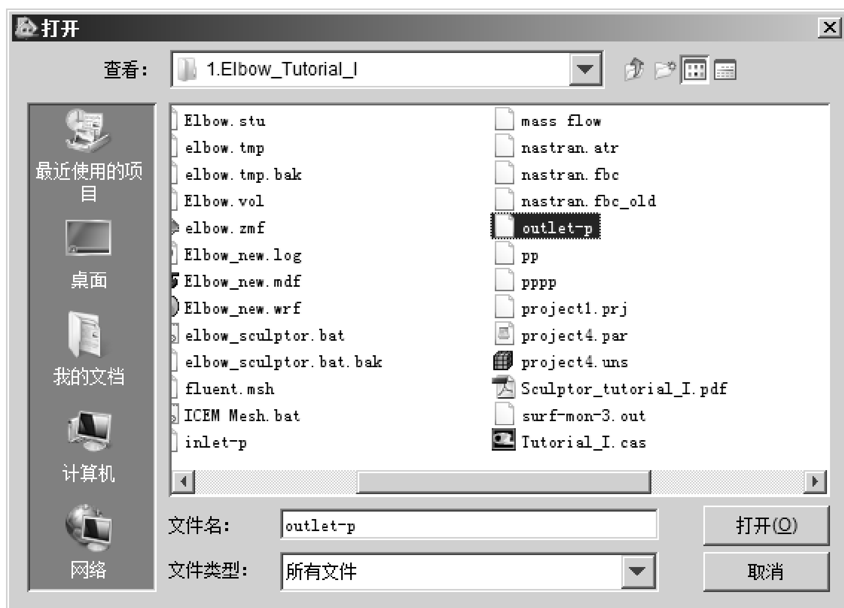


图 8-72　结果 outlet-p 输出对话框

25）单击“inlet-p”数据区中 inlet 后面的字符串“33.34005”，在“Parameter”文本框后输入名称“inlet”参数名，单击“写入”按钮，此时“33.34005”背景变为绿色。左侧“Actions”和右侧“Input Parameters”分别显示，如图 8-73 所示。

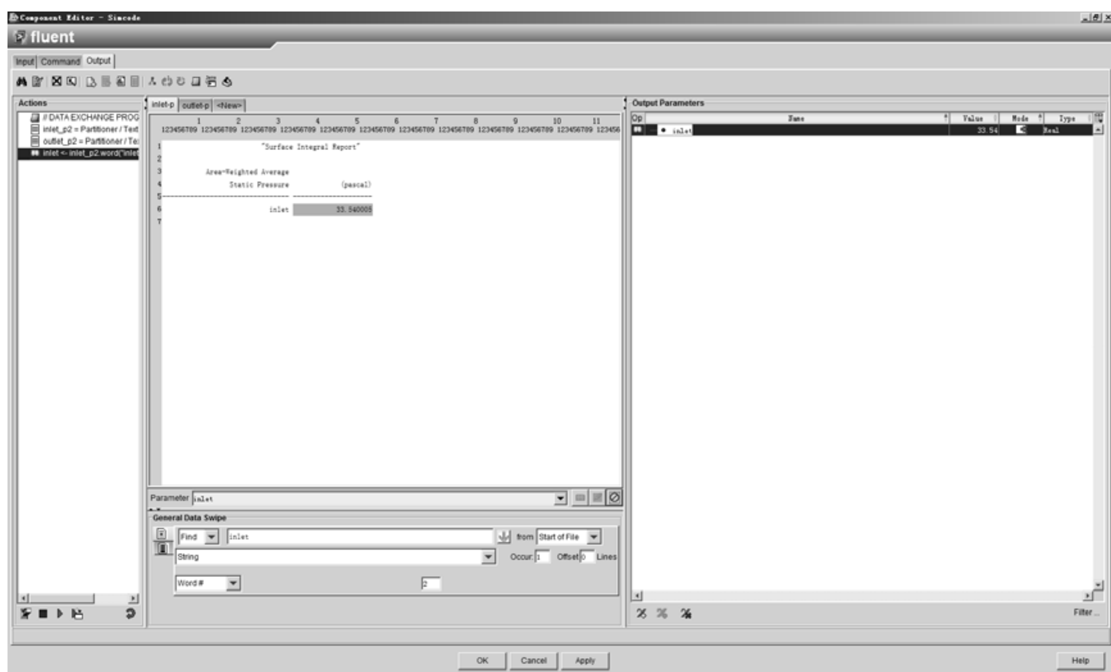


图 8-73　定义输出结果变量 inlet-p

26）单击“outlet-p”数据区中“outlet”后面的字符串“0”，在“Parameter”文本框后输入名称“outlet”参数名，单击“写入”按钮，此时“0”背景变为绿色。左侧“Actions”和右侧“Input Parameters”分别显示，如图 8-74 所示。

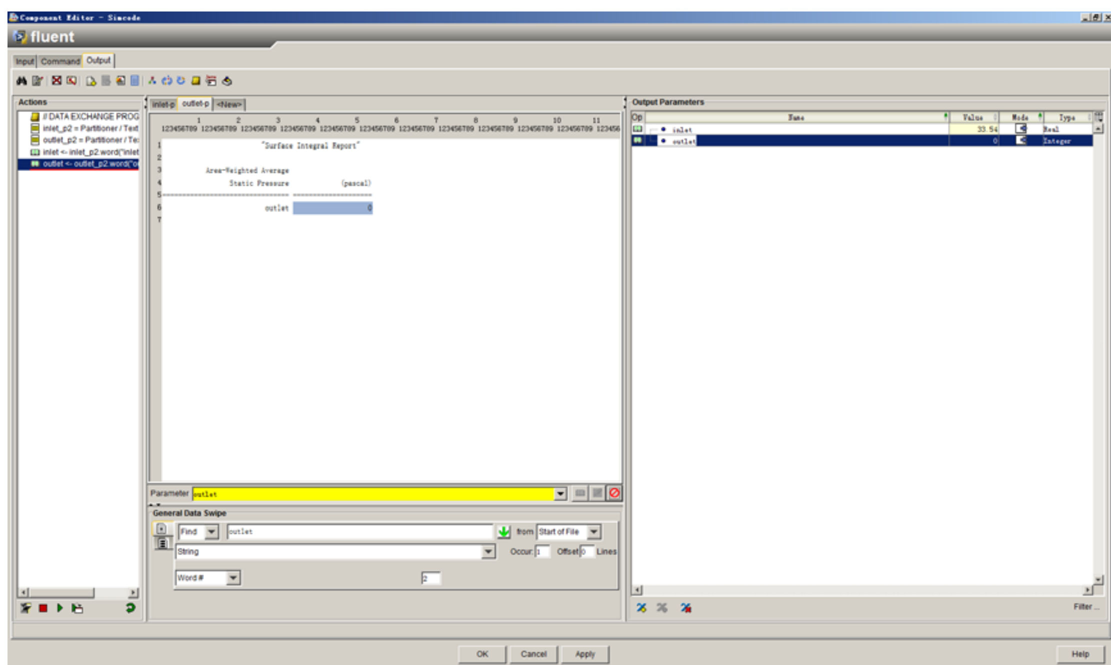


图 8-74　定义输出结果变量 outlet-p

27）选择任务窗口“Sim-flow”>“Application Components”，再选择“Calculator”组件，将按钮拖曳至“Task1”中，如图 8-75 所示。

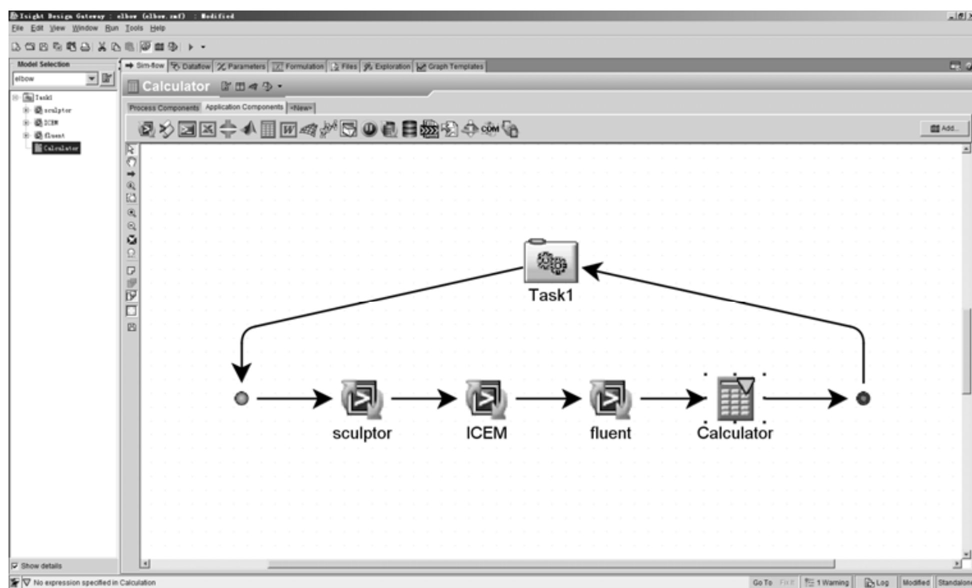


图 8-75 创建 Calculator 工作流

28）双击“Calculator”按钮，弹出“Component Editor-Calculator”对话框，在对话框内输入“p = inlet - outlet”，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-76 所示。

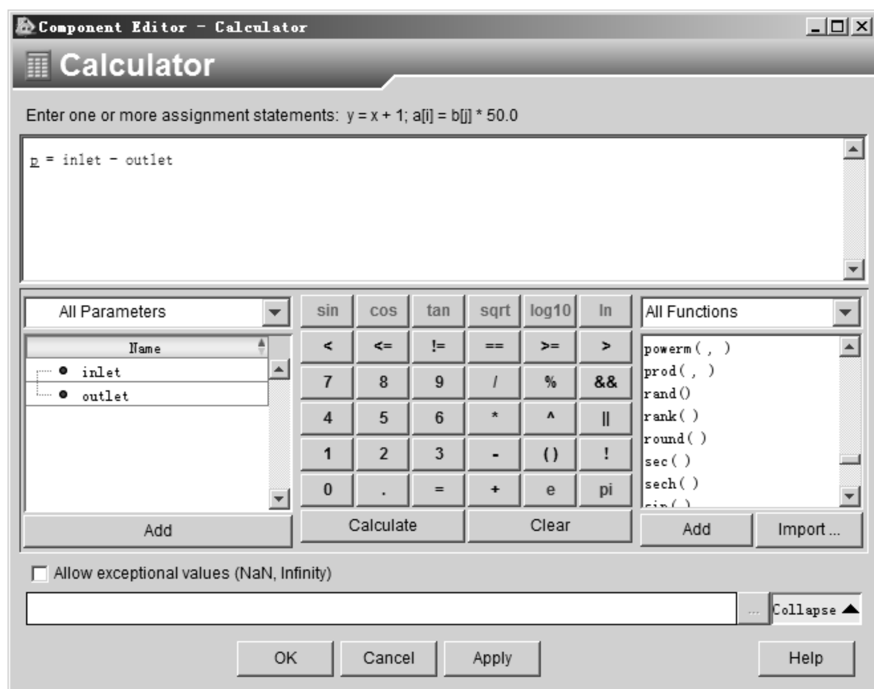


图 8-76 定义优化目标

29）右键选择“task1”>“Change To”>“New”，弹出“Select New Component”对话框，选择“Optimization”选项，单击“OK”按钮确认操作，如图 8-77 所示。

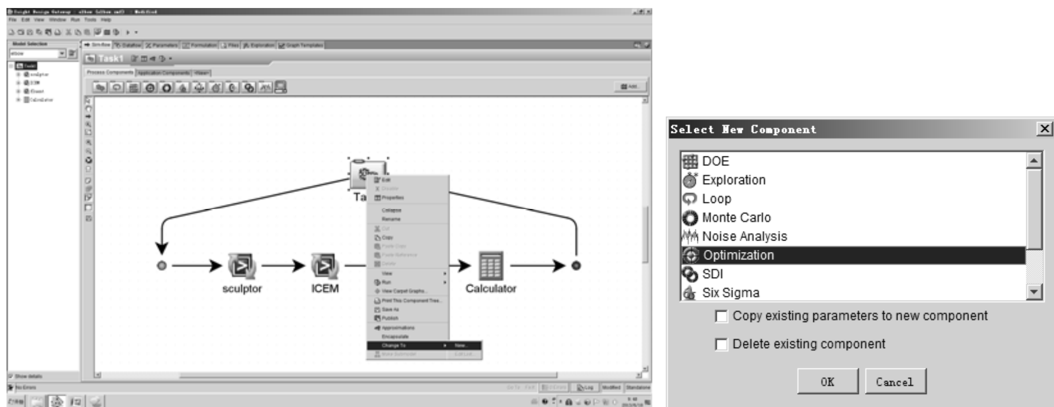


图 8-77　Optimization 组件创建

30）双击“Optimization1”，弹出“Component Editor-Optimization”对话框，选择“General”>“Optimization Technique”>“NSGA-Ⅱ”，如图 8-78 所示。

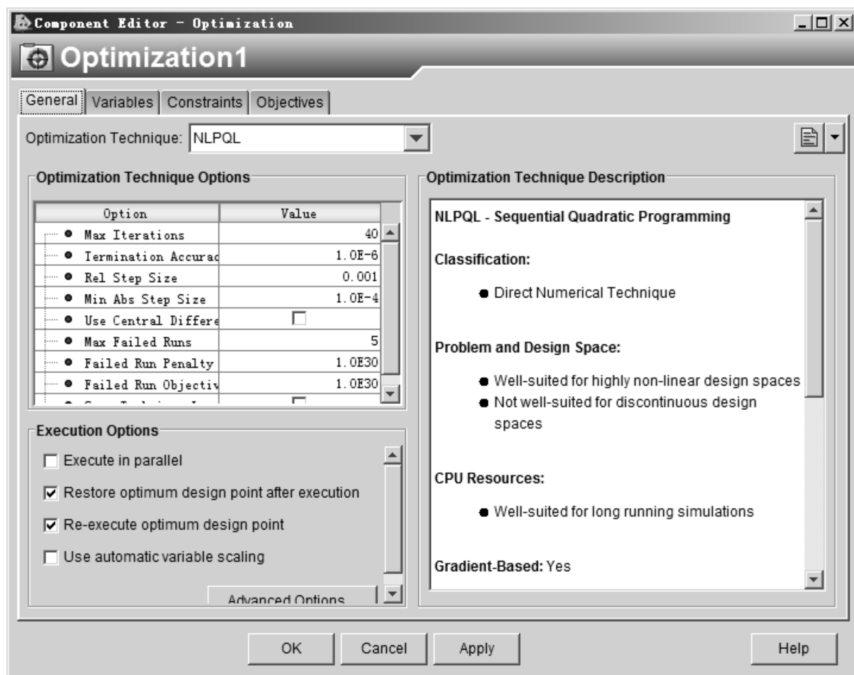


图 8-78　选择优化方法

31）切换至“Variables”属性窗口，选择变量“h、w”。“Lower Bound”都设置为“-5”，“Upper Bound”都设置为“5”，“Value”设置为“0”，选择变量“step”，“Value”属性设置为“500”，如图 8-79 所示。



图 8-79　输入计算步数

32）切换至“Objectives”属性窗口，选择优化目标“p”，设置“Direction”项为“minimize”方式。单击“OK”按钮确认操作，如图 8-80 所示。

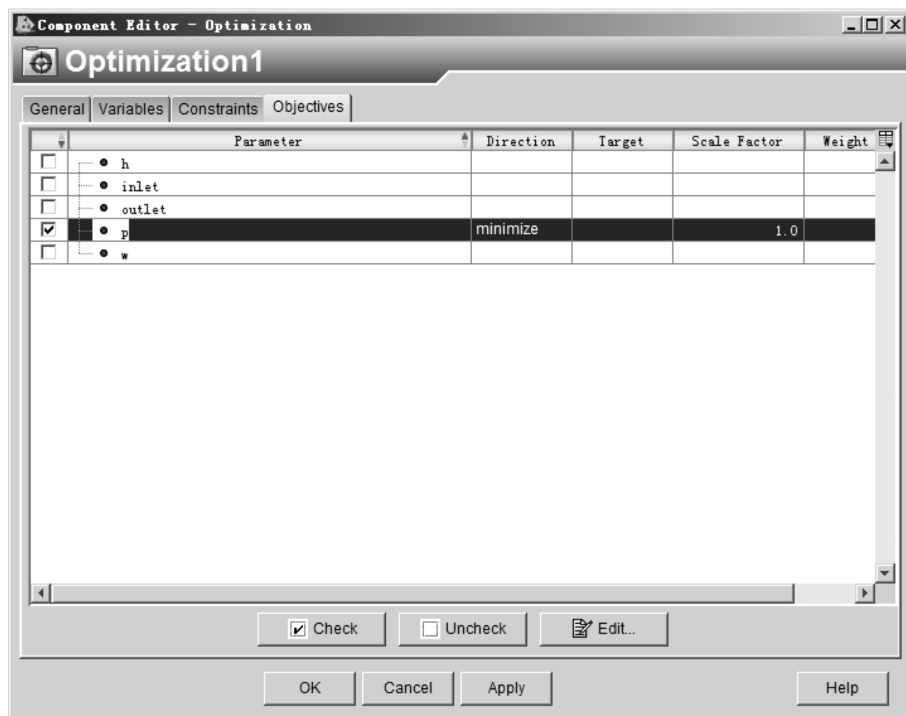


图 8-80　设置目标值最小

33）右键选择“Optimization1”>“Run”>“Run Component（Optimization1）”，对弯管进行优化，如图 8-81 所示。

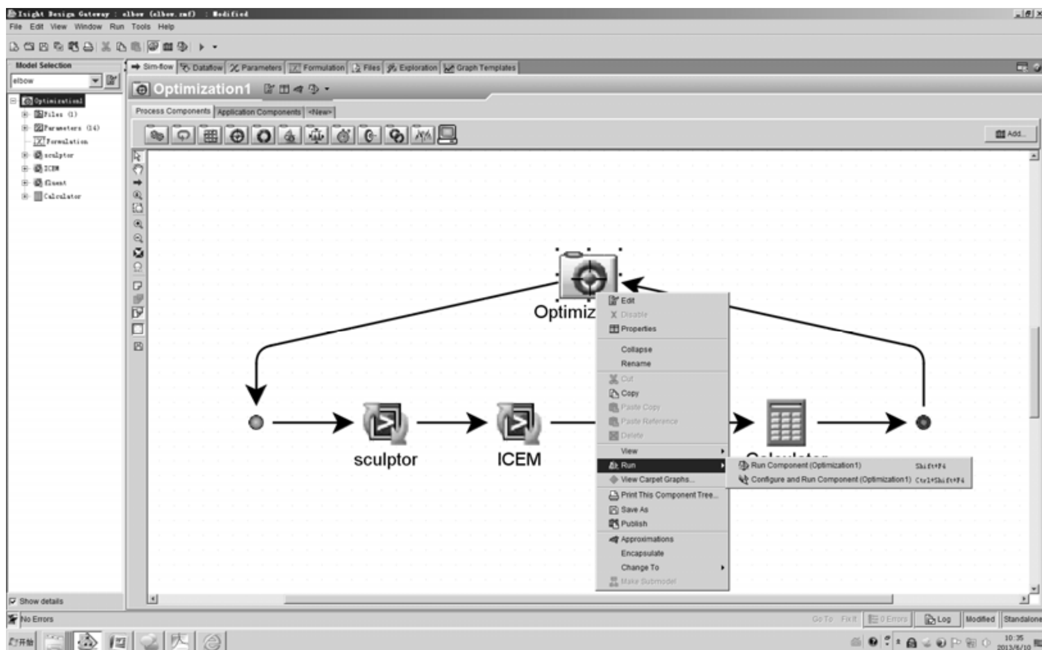


图 8-81　运行 Optimization1

34）“Optimization1”运行完成后的结果如图 8-82 所示。

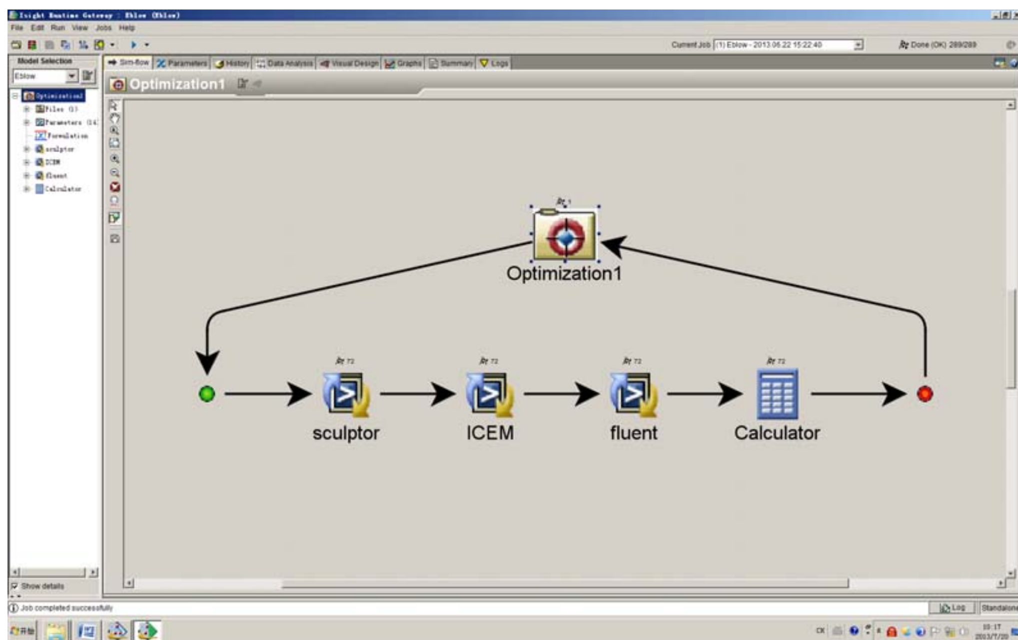


图 8-82　计算结果

8.2.5 弯管优化后计算结果的后处理

1）单击流程 Tap 菜单，选择“History”项，显示计算过程每一步的计算结果，如图 8-83 所示。

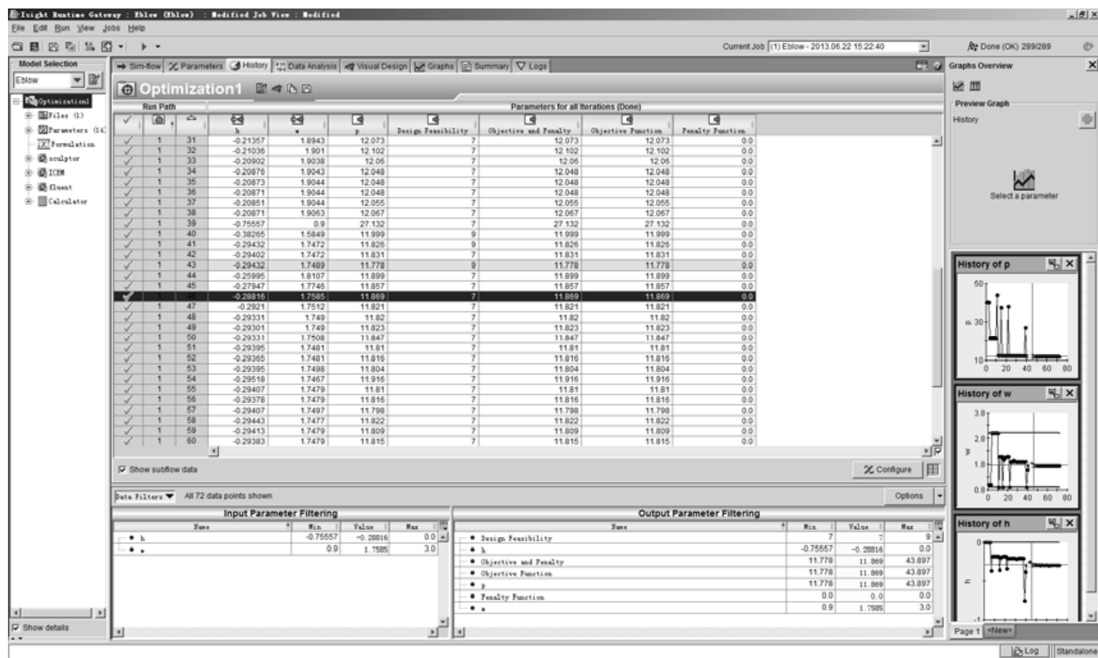


图 8-83　计算结果

2）选择 TAB 项“Graph”，单击“Creates a Graph for this component”按钮，弹出图 8-84 所示的对话框。

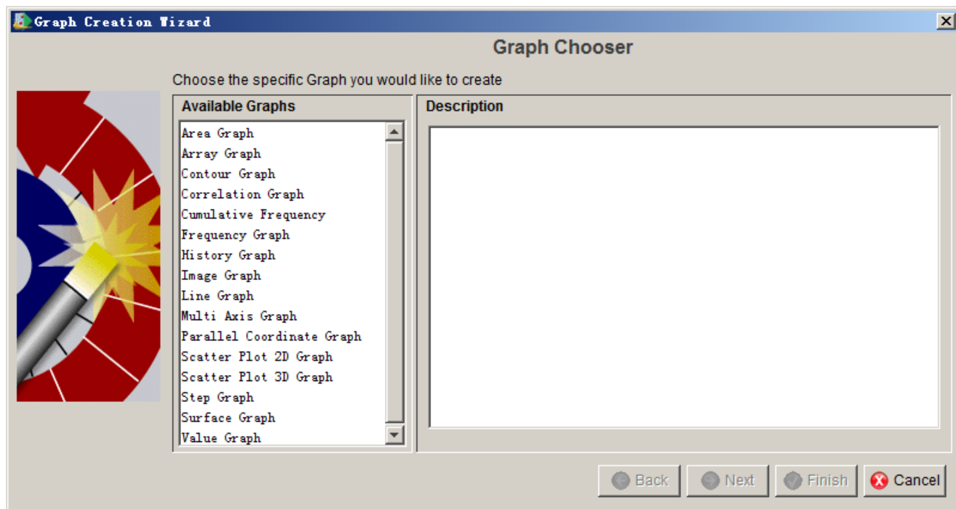


图 8-84　Graph Chooser 对话框

3）选择“Available Graphs”>“History Graph”，单击“Next”按钮，在弹出对话框中选择参数“h、w、p”，单击“Next”按钮，如图 8-85 所示。

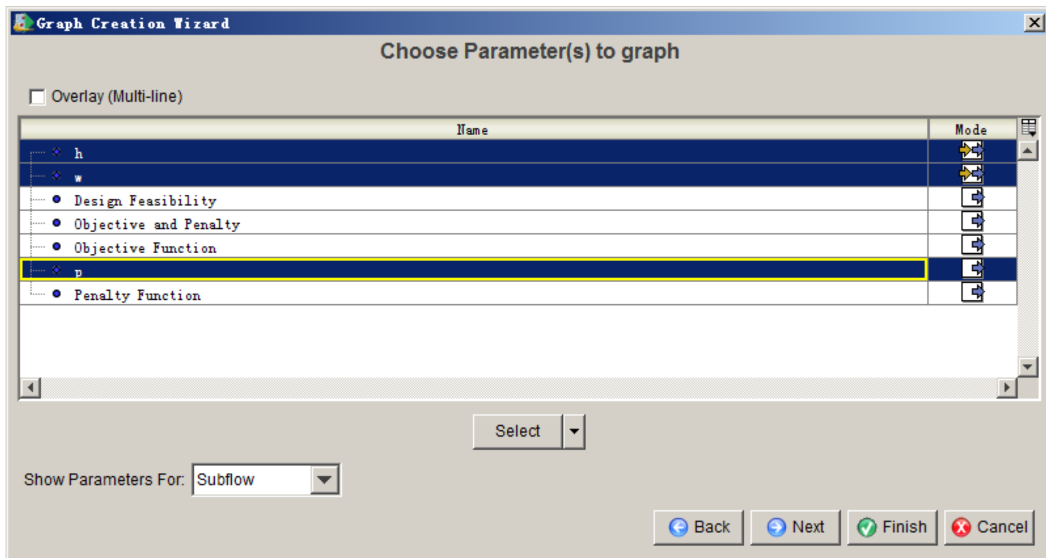


图 8-85　参数 w、h、p 选择

4）默认对话框中的选项，单击“Next”按钮弹出对话框，如图 8-86 所示。

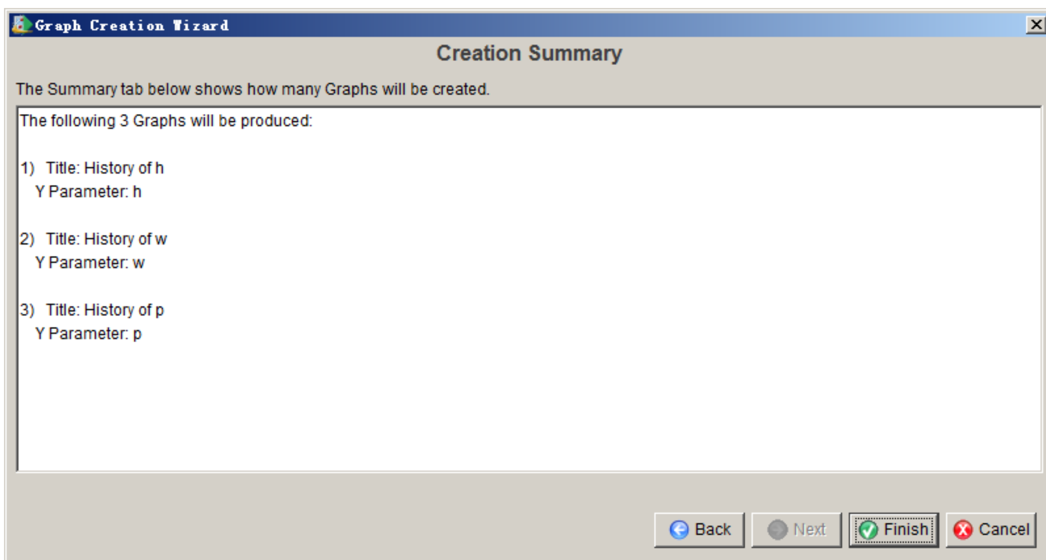


图 8-86　“Creation Summary”对话框

5）单击“Finish”按钮，弹出参数“w、h、p”变化过程图，从图中可以看出 43 步以后计算开始收敛，压力值趋于最小，如图 8-87 所示。

6）选择 TAB 项“Graph”，单击“Creates a Graph for this component”按钮，弹出图 8-88 所示的对话框。

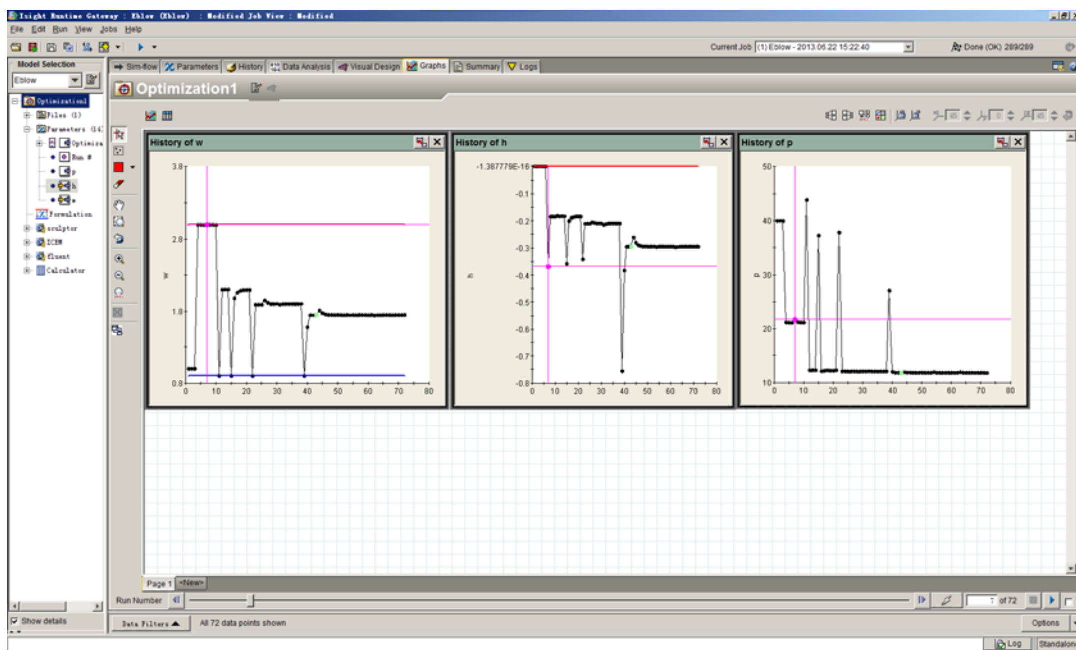


图 8-87 参数“w、h、p”的变化过程

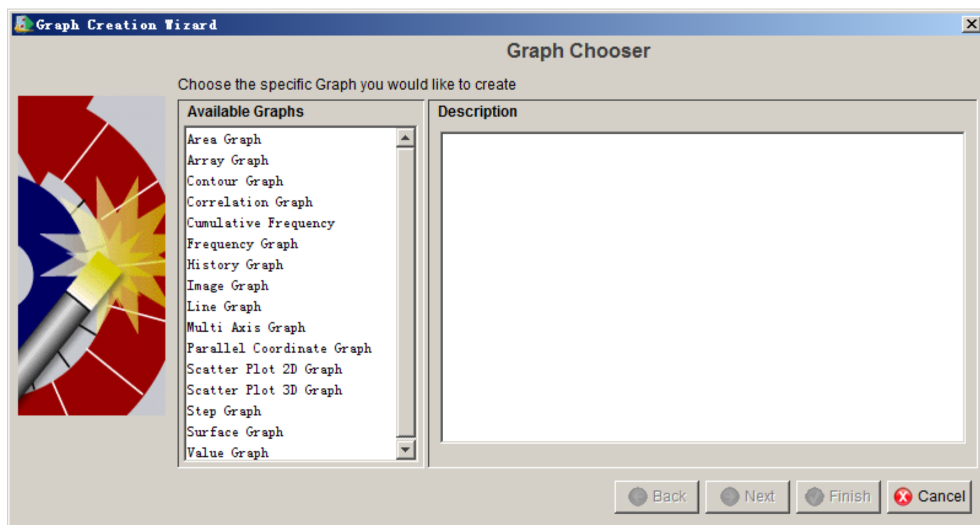


图 8-88 “Graph Chooser”对话框

7）选择“Available Graphs”>“Scatter Plot 2D Graph”，单击“Next”按钮，在弹出的“Graph Creation Wizard”对话框中选择参数“h、w、p”，单击“Next”按钮，如图 8-89 所示。

8）默认对话框中的选项，单击“Next”按钮，弹出图 8-90 所示的对话框。

9）单击“Finish”按钮，生成变量 h、w 与 p 的关系图，如图 8-91 所示。

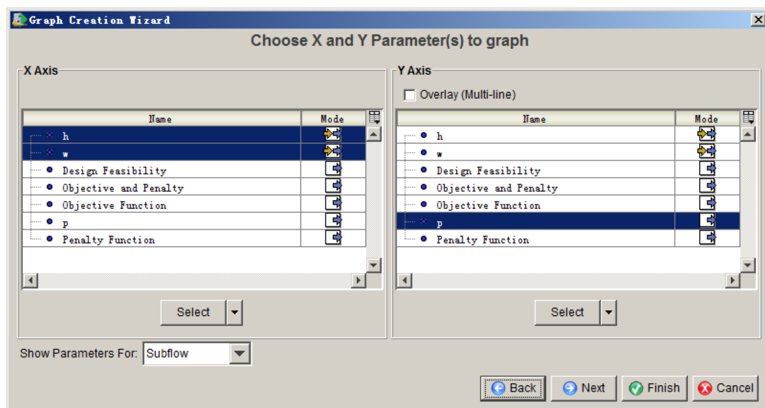


图 8-89　参数 w、h、p 选择

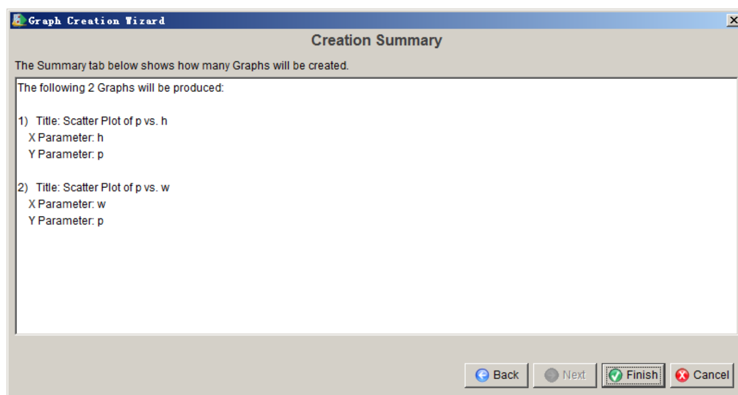


图 8-90　“Graph Creation Wizard”对话框

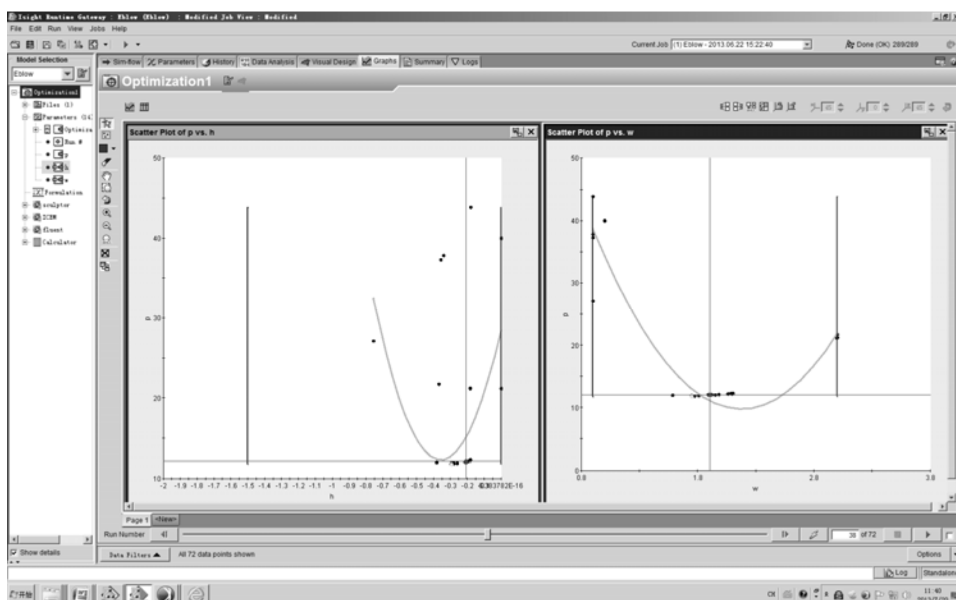


图 8-91　h、w 与 p 的关系图

10）选择 TAB 项“Graph”，单击“Creates a Graph for this component”按钮，弹出图 8-92 所示的对话框。

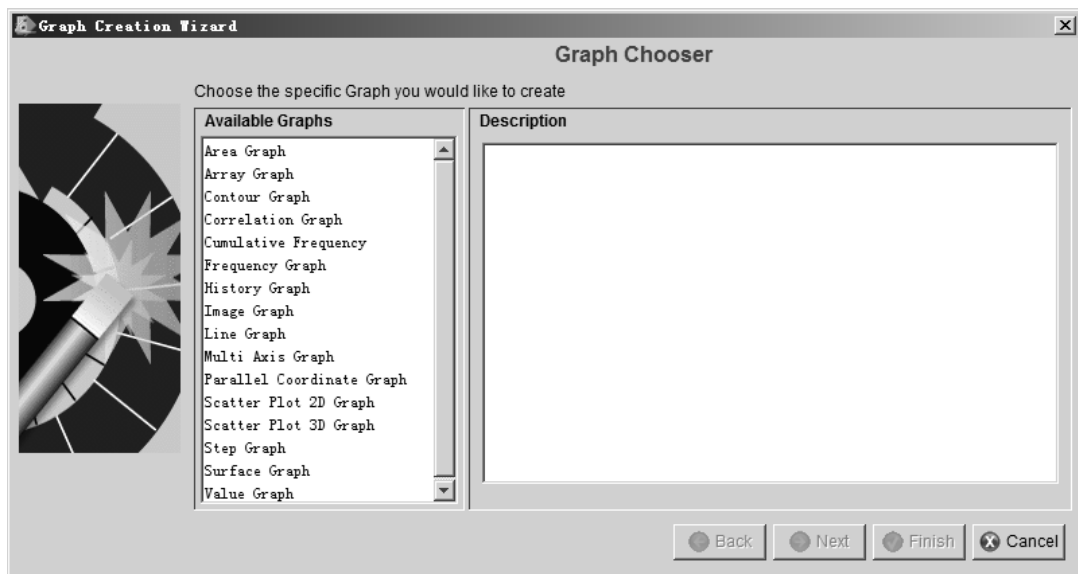


图 8-92　Graph Chooser 对话框

11）选择“Available Graphs”>“Correlation Graph”，单击“Next”按钮，在弹出的对话框中选择参数“h、w、p”，单击“Next”按钮，如图 8-93 所示。

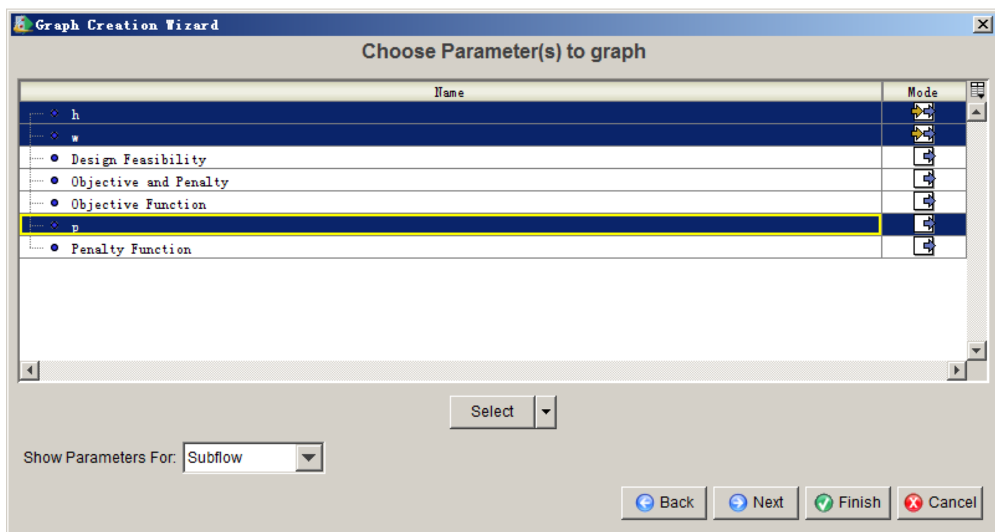


图 8-93　参数 h、w、p 选择

12）默认对话框中的选项，单击“Next”按钮，弹出图 8-94 所示的对话框。



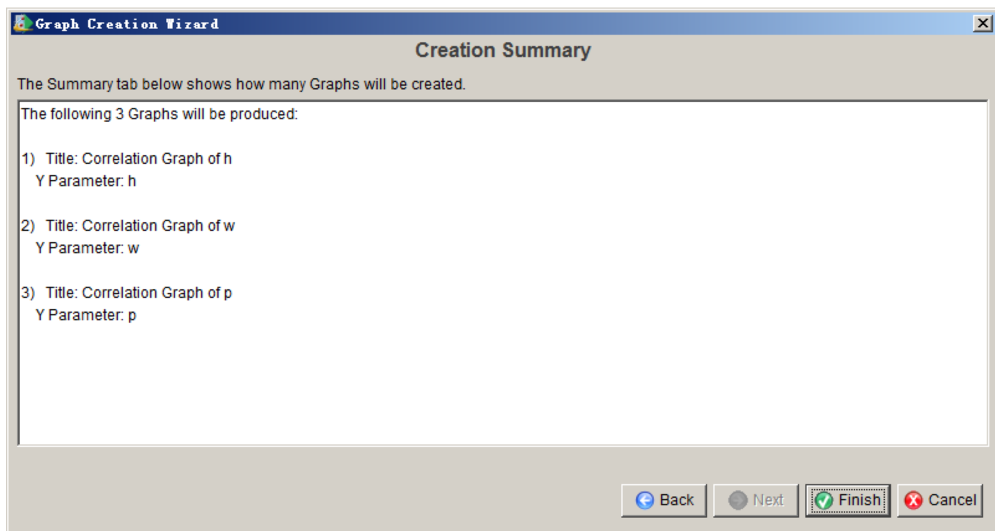


图 8-94 “Graph Creation Wizard”对话框

13）单击“Finish”按钮，弹出参数“h、w、p”之间的关系图，如图 8-95 所示。其中，蓝色的条形表示正效应，即变量增大，则阻力增大（正比关系）；红色的条形表示负效应，即变量增大，则阻力减小（反比关系）。

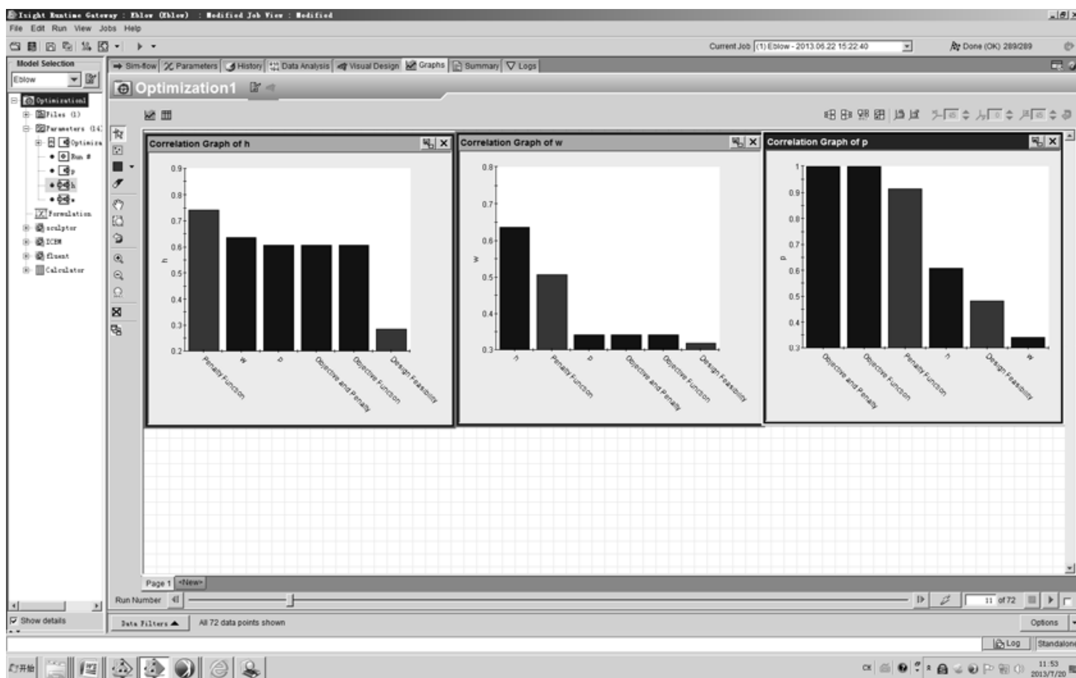


图 8-95 h、w、p 之间的关系图

14）根据优化结果表 8-1 所示，h、w 两个变量对目标值 p 表现为正效应的影响，当两个变量都减小时，目标值 p 也减小。因为目标值设定为阻力 p 最小，所以在弯管设计中应减

少两个参数 h 和 w 的值。

表 8-1 最优优化结果

h	w	p	Design Feasibility
0	1	40.04438	9
0	1.001	39.98523	9
0	3	21.22253	9
−0.0001	3	21.1894	9
0	2.997	21.16285	9
−0.181826213	2.102392	12.26678	9
−0.199361644	1.982153	12.11835	9
−0.209853071	1.891149	12.08155	9
−0.209853071	1.89304	12.05755	9
−0.20463428	1.95141	12.04132	9
−0.382654918	1.584913	11.99908	9
−0.294316249	1.747162	11.82587	9
−0.294316249	1.748909	11.77819	9

注意：本章对应的源文件详见光盘文件夹“1.Elbow_Tutorial_I”。

第 9 章 高速列车头型气动阻力优化

本章主要内容：

本章主要介绍 FLUENT 软件与 Isight 软件多学科优化联合仿真分析方法，通过高速列车头型气动阻力优化案例，让读者学会利用 FLUENT 软件进行多目标优化设计的方法及技巧。

本章学习目标：

✧ 高速列车气动性能的分析方法。

✧ 多目标优化理论分析方法。

✧ 掌握 Isight 软件试验设计及优化计算的设置方法。

✧ 掌握优化计算结果的分析工作。

✧ 掌握多学科优化软件 Isight 在高速列车中的多目标优化算法的应用。

9.1 多目标优化方法介绍

20 世纪 70 年代以来，多目标优化问题在国际上引起了广泛的关注，并迅速发展为一门新兴的学科。对于实际问题，各目标之间可能是相互冲突的，目标的改善可能相互抵触，因此必须进行折中。高速列车外形的流线型设计，特别是流线型头部设计是高速列车研究的重要课题。人们追求造型最佳的高速列车外形，很大程度上是为了改善高速列车的空气动力学性能。高速列车头部外形对高速列车的空气动力学性能影响很大，设计高速列车头型时，需要综合考虑列车行驶过程中的空气阻力、升力等因素，而这些目标之间可能会发生冲突，所以，高速列车新头型的研发设计是多目标的外形优化问题。

9.1.1 多目标优化理论

对多个目标同时实施最优化的问题称为多目标优化问题（Multi-objective Optimization Problem，MOP），也称多准则优化问题（Multi-criteria Optimization Problem）、多性能优化问题（Multi-performance Optimization Problem）或者矢量优化问题（Vector Optimization Problem）。多目标优化问题的数学表达式为：

$$\begin{aligned} &\min \quad f_m(\mathbf{x}) && m=1,2,\cdots,M \\ &\text{s.t.} \quad g_j(\mathbf{x})\leqslant 0 && j=1,2,\cdots,J \\ &\qquad\; h_k(\mathbf{x})\leqslant 0 && k=1,2,\cdots,K \\ &\qquad\; x_i^L\leqslant x\leqslant x_i^U && i=1,2,\cdots,N \end{aligned} \tag{9-1}$$

式中 x_i——第 i 个设计变量，N 表示设计变量的总数；

x_i^L——第 i 个设计变量取值的下限；

x_i^U——第 i 个设计变量取值的上限；

$f_m(\mathbf{x})$——第 m 个子目标函数，M 为子目标函数的总数；

$g_j(\mathbf{x})$——第 j 个不等式约束条件，J 为不等式约束的总数；

$h_k(\mathbf{x})$——第 k 个等式约束条件，K 为等式约束的总数。

在大多数情况下，各子目标之间往往是相互冲突的，某个子目标的改善可能引起其他子目标的降低，即同时使得多个子目标均达到最优解一般是不可能的，否则不属于多目标优化研究的范畴。解决多目标优化问题的最终目的只能是在各目标之间进行协调权衡和折中处理，使得各子目标尽可能达到最优。因此，需要重新定义有关多目标优化问题的解的相关概念。

9.1.2 解的占优关系

对于多目标优化问题，目标函数是由多个子目标构成的向量。比较两个解的优劣，就需要比较这两个向量的大小，这可以通过定义向量的自然序来实现。以向量 $\mathbf{a}=(a_1,a_2)$ 和 $\mathbf{b}=(b_1,b_2)$ 两个二维向量为例，表 9-1 定义了它们之间的大小关系。图 9-1 给出了这两个二维向量之间的 4 种关系，其中第 4 种情况无法采用向量自然序进行定义，因此，第 4 种情况下无法比较大小。

表 9-1 向量自然序的定义（以二维向量为例）

名 称	定 义
相等	$\mathbf{a}=\mathbf{b}\leftrightarrow a_i=b_i,\forall i=1,2$
小于等于	$\mathbf{a}\leqslant\mathbf{b}\leftrightarrow a_i\leqslant b_i,\forall i=1,2,\mathbf{a}\neq\mathbf{b}$
严格等于	$\mathbf{a}<\mathbf{b}\leftrightarrow a_i<b_i,\forall i=1,2$

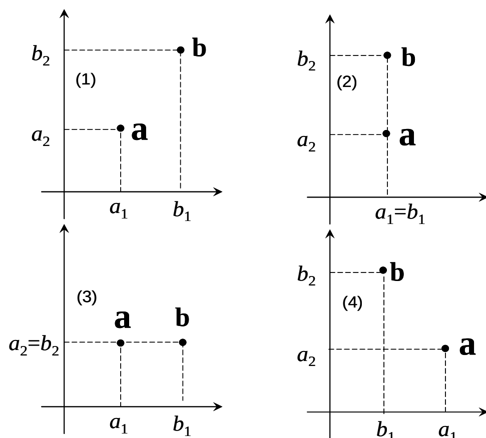


图 9-1 两个向量之间的大小比较

把向量的自然序的概念引入到多目标问题中，就可以得到多目标优化问题的两类关系：占优关系和不可比较关系。

当如下两个条件都满足时，称解 $\mathbf{x}'$ 对解 $\mathbf{x}''$ 占优：

1）对于所有的目标函数，解 $\mathbf{x}'$ 都不必解 $\mathbf{x}''$ 差，即有 $f_m(\mathbf{x}') \leqslant f_m(\mathbf{x}''), m = 1,2,\cdots,M$ 。

2）至少存在一个目标函数使解 $\mathbf{x}'$ 比解 $\mathbf{x}''$ 好，即存在 i，$1 \leqslant i \leqslant M$，使得 $f_i(\mathbf{x}') < f_i(\mathbf{x}'')$。

对于如下情况，则称解 $\mathbf{x}'$ 和解 $\mathbf{x}''$ 无法比较：

1）至少对某一个目标函数使解 $\mathbf{x}'$ 比解 $\mathbf{x}''$ 好，即存在 i，$1 \leqslant i \leqslant M$，使得 $f_i(\mathbf{x}') < f_i(\mathbf{x}'')$。

2）至少对某一个目标函数使解 $\mathbf{x}''$ 比解 $\mathbf{x}'$ 好，即存在 j，$1 \leqslant j \leqslant M$，使得 $f_i(\mathbf{x}') > f_i(\mathbf{x}'')$。

在一个解集空间 P 中，没有被其他解所占优的解所构成的集合称为非劣解集，记为 P'。

9.1.3 Pareto 最优解集和 Pareto 前沿

法国经济学家 V. Pareto 最早研究了经济学领域内的多目标优化问题，提出了 Pareto 最优解集的概念。由于多目标优化问题中各个目标之间是相互冲突的，优化解不可能是单一的解，而是一个解集，称为 Pareto 最优解集，而对应的目标函数空间的像称为 Pareto 前沿。

若 $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$（$\mathbf{X}$ 为多目标优化的可行域），不存在另外可行点 $\mathbf{x}' \in \mathbf{X}$，使得 $f_m(\mathbf{x}') \leqslant f_m(\mathbf{x}'')$，$m = 1,2,\cdots,M$（$M$ 表示子目标总数），且其中至少有一个严格不等式成立，则称 $\mathbf{x}$ 是多目标优化的一个 Pareto 最优解。

所有的 Pareto 最优解所构成的集合称为 Pareto 最优解集。在整个设计可行空间搜索得到的非劣解集就是 Pareto 最优解集。

Pareto 最优解集在目标函数空间中的像称为 Pareto 前沿。

根据可行域的情况，Pareto 最优解集也可能存在全局解和局部解的情况。全局最优解集是整个设计可行空间中搜索得到的非劣解集。

9.1.4 多目标优化算法

目前，多目标优化问题的解决办法主要有两大类：归一化方法和非归一化方法。

归一化方法是把多个目标转化成单一目标进行优化的方法，可直接利用成熟的单目标优化方法。在取不同的权值时，可以得到一组解来逼近 Pareto 最优解集。归一化方法的权值并不是由决策者设定的，而是由优化者决定的，这在很大程度上受到了优化者主观的影响。归一化方法对 Pareto 最优前沿的形状很敏感，不能处理 Pareto 前沿的凹部，并且求解的效率较低。

非归一化方法是采用 Pareto 机制直接处理多个目标的优化技术，不需要将多个目标转化为单一目标，因此解决了归一化方法的缺点。非归一化方法能够使所求解集的前沿与 Pareto 前沿尽量接近，并尽量均匀覆盖 Pareto 前沿。非归一化方法中的代表方法是：多目标遗传算法。

本项目采用多目标遗传算法 NSGA-II 求解 CRHTC 的多目标气动优化问题，NSGA-II 采用带有精英策略的非劣排序，使用简单的拥挤算子，不需要定义任何的参数来保持种群多样性。在进化过程中，首先对种群 P 进行遗传操作，得到种群 Q；然后将两种群合并后，进行非劣排序和拥挤距离排序，形成新的种群 P，反复进行直到结束。NSGA-II 的具体过程描述如下：

1）随机产生初始种群 P_0，然后对种群进行非劣排序，每个个体被赋予秩；再对初始种群执行二元锦标赛选择、交叉和变异，得到新的种群 Q_0，令 $t = 0$。

2）形成新的种群 $R_t = P_t \cup Q_t$，对种群 R_t 进行非劣排序，得到非劣前端 F_1，F_2，……

3）对所有的 F_i 按拥挤比较操作 $\prec_n$ 进行排序，并选择其中最好的 N 个个体形成种群 P_{t+1}。

4）对种群 P_{t+1} 执行复制、交叉和变异，形成种群 Q_{t+1}。

5）如果终止条件成立，则结束；否则，$t = t+1$。

9.2 高速列车头型气动阻力优化应用实例

9.2.1 变形软件 Sculptor 对高速列车车头的体网格进行变形

1）选择菜单项“File”>“Import Mesh”>“CFD…”>“Fluent Case…”，打开文件 Tutorial_ I.cas，如图 9-2 和图 9-3 所示。

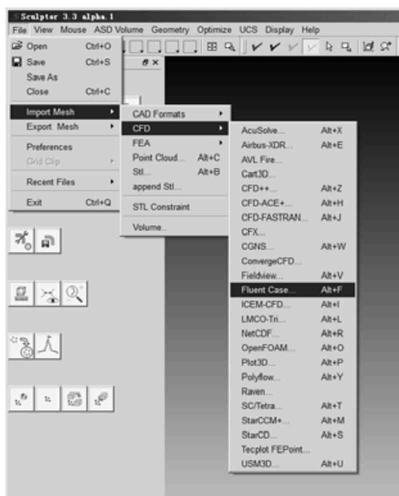


图 9-2 读取 Fluent 网格



图 9-3 读取.cas 文件

2）选择菜单栏“Display”>“Visibility”>“Regions”，弹出“RegionVisibilityDlg”对话框，选择需要隐藏的计算域“top、side、outlet、inlet、ground”，单击 >> 按钮，再单击“OK”按钮确认操作。如图 9-4 所示。

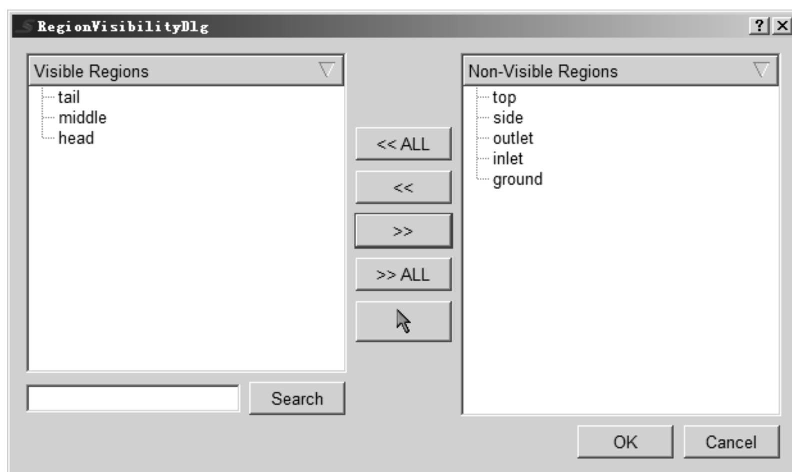


图 9-4　隐藏计算域

3）单击左侧树形菜单创建体网格变形区域，软件左侧显示树形界面，选择“Create Volume”>“Regions”>“head”，单击“Apply”按钮生成网格控制区域，再单击“OK”按钮确认操作，如图 9-5 所示。

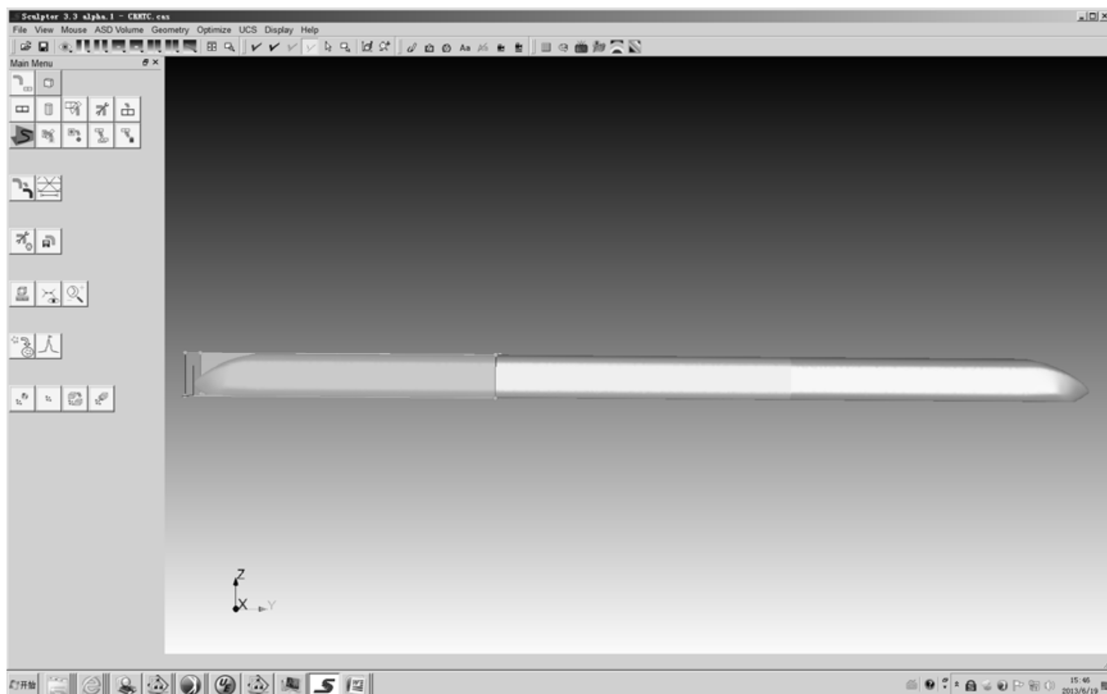


图 9-5　生成网格控制域

4）单击左侧树形菜单对网格控制域进行调整，软件左侧显示树形界面，选择“Modify”>“Volume 1”>“s，u#2”对网格控制域进行调整，拖动 *Y* 向的滑块，调整至图 9-6 所示位置。单击“OK”按钮确认操作。

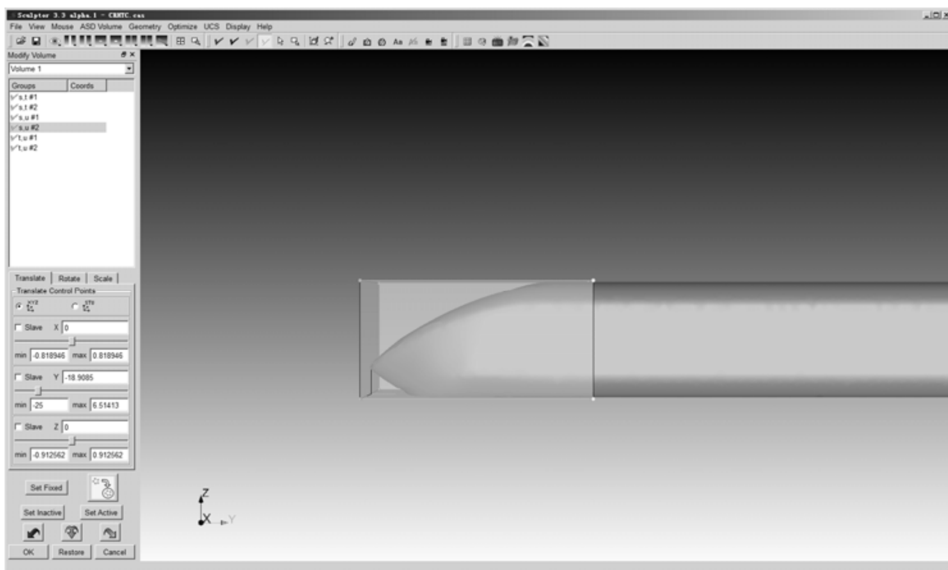


图 9-6　调整网格控制域

5）单击左侧树形菜单按钮，软件左侧树形界面，选择“Insert/Remove Control Points”>“Groups”>“s，t#2”，“s,t#2”面上的点变为黄色，选择“Plane”>“Insert Position”>“After a Planes”，单击“Insert”按钮，在图形界面的“s,t#2”面上会增加一个面，如图 9-7 所示。

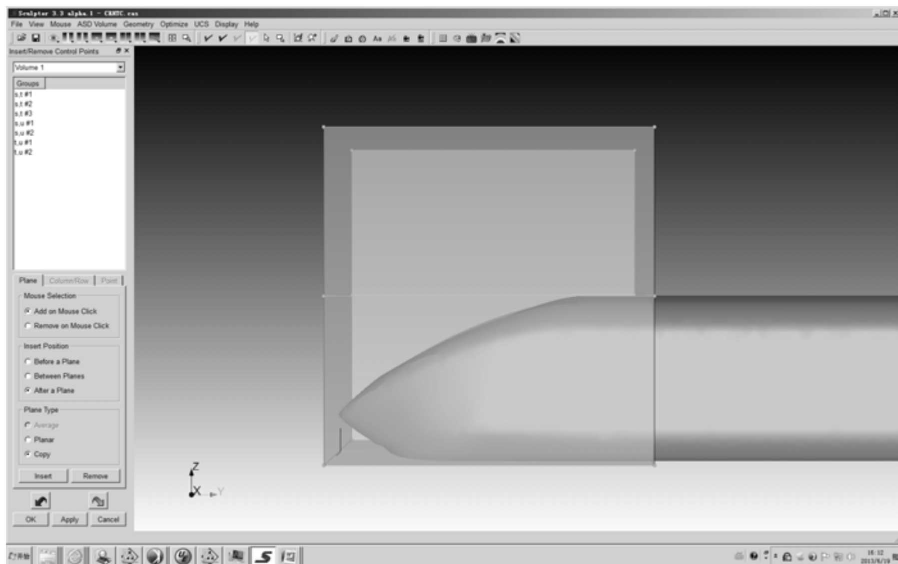


图 9-7　在 s,t#2 面上增加一个面

6）选择“Insert/Remove Control Points”>“Groups”>“t,u#1”，“t,u#1”面上的点变为黄色，选择“Plane”>“Insert Position”>“Before a Planes”，单击“Insert”按钮，在图形界面的 t,u#1 面上会增加一个面，选择“Insert/Remove Control Points”>“Groups”>“t,u#3”，

“t,u#3”面上的点变为黄色。选择“Plane”>“Insert Position”>“After a Planes”，单击“Insert”按钮，在图形界面的“t,u#3”面上会增加一个面，按照上述方法在面“s,u#2”外插入一个面，如图 9–8 所示。

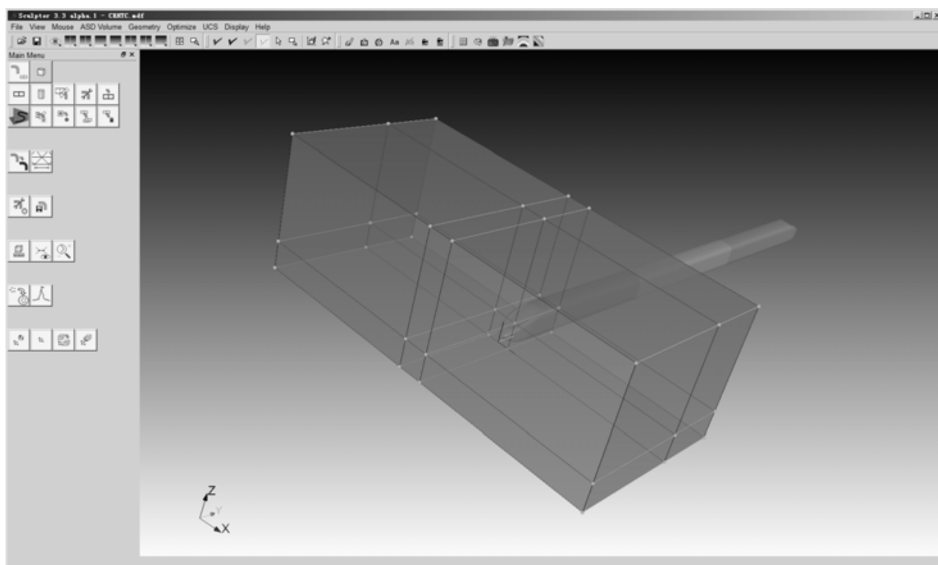


图 9–8　在控制域内插入控制面

7）单击左侧树形菜单按钮，选择“s,u#2、s,u#3”两个面在两个面之间增加控制面，软件左侧树形界面，选择“Insert/Remove Control Points”>“Groups”>“s,u#1 s,u#2”，选择“Plane”>“Insert Position”>“Between Planes”，选择工具，单击两个面之间的连线插入面，可以选择任意面，单击“OK”按钮确认操作，如图 9–9 所示。

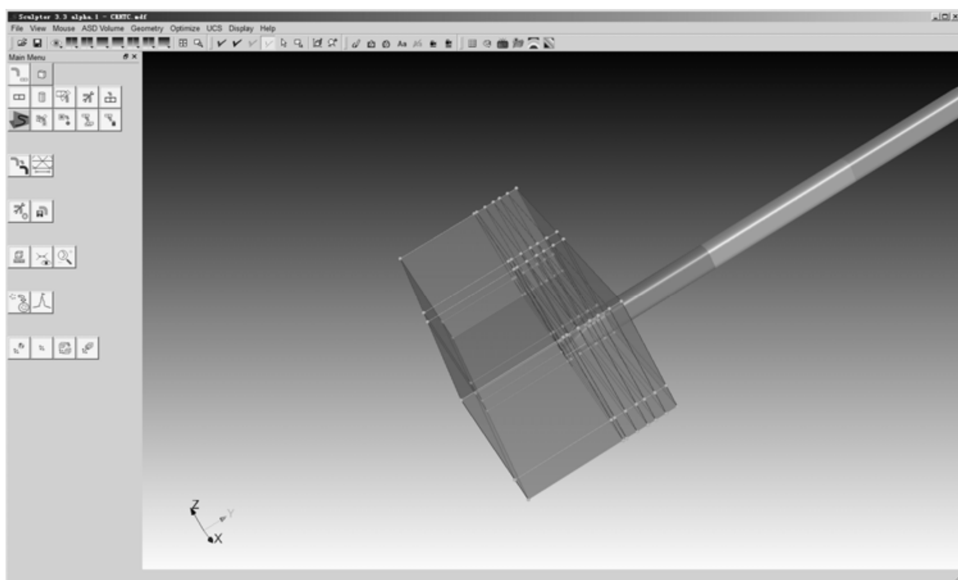


图 9–9　插入控制面

8）调整车头包络体形状，单击工具栏和两个按钮，分别选择需要调整位置的点，单击按钮调整值至图 9-10 所示的位置。

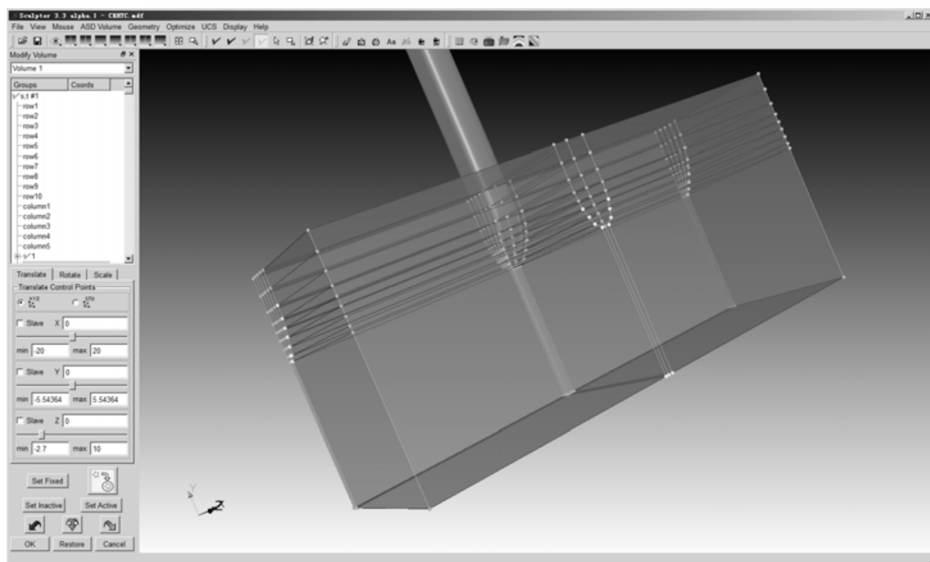


图 9-10　调整包络线的位置

9）在“s,t#1、s,t#3”之间插入 3 个面，在“t,u#2 t,u#3”两个面之间插入 1 个面，如图 9-11 所示。

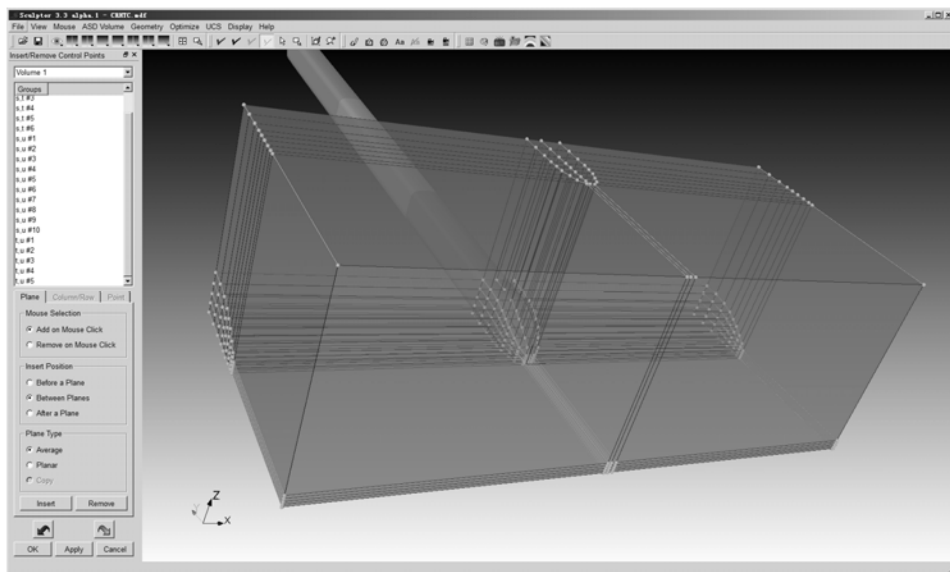


图 9-11　插入变形区域包络体面

10）单击软件左侧图形菜单栏按钮冻结控制域上所有的点，窗口弹出“Warning”对话框，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-12 所示。

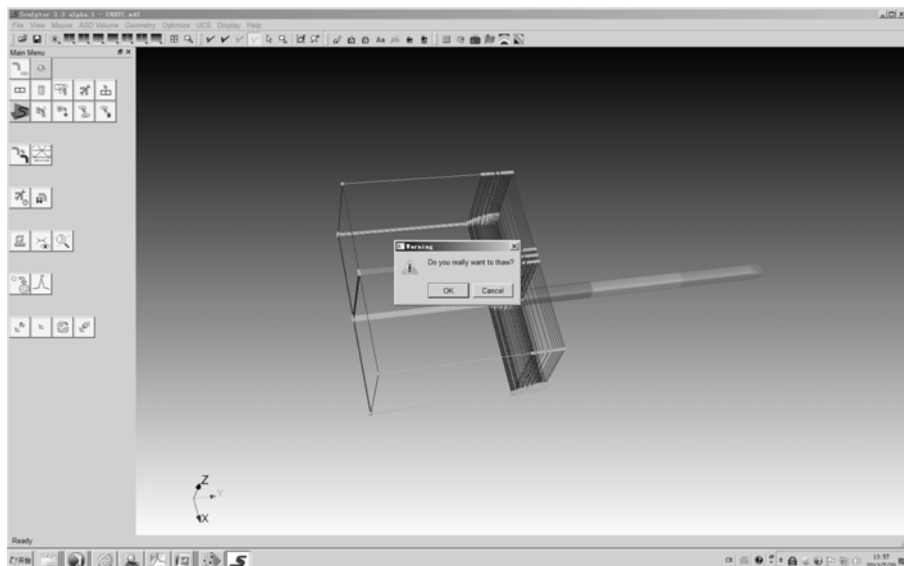


图 9-12　冻结控制域所有控制点

11）设置变量“H”，首先单击图形界面菜单栏按钮，然后单击按钮，选择需要设置变量的点。选择“X Coefficients，Y Coefficients”>“Remove”，对话框中输入“0”，单击“Set coefficient”按钮确认设置，选择“Z Coefficients”>“Remove”，对话框中输入“1”，单击“Set coefficient”按钮确认设置，将此变量命名为“H”，单击“Accept Groups”按钮确认此变量设置。单击“Done”按钮确认操作，如图 9-13 所示。

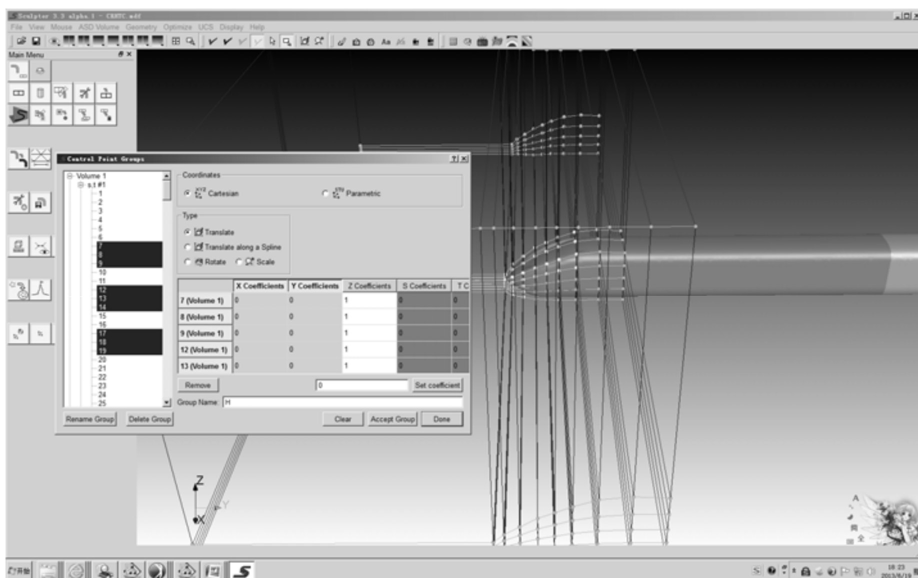


图 9-13　设置变量 H

12）设置变量“L”，首先单击图形界面菜单栏按钮，然后单击按钮，选择需要设置变量的点。选择“X Coefficients，Z Coefficients”>“Remove”，对话框中输入“0”，单击“Set coefficient”按钮确认设置，选择“Y Coefficients”>“Remove”，对话框中输入“−1”，

单击“Set coefficient”按钮确认设置，将此变量命名为“L”，单击“Accept Groups”按钮确认此变量设置。单击“Done”按钮确认操作，如图 9−14 所示。

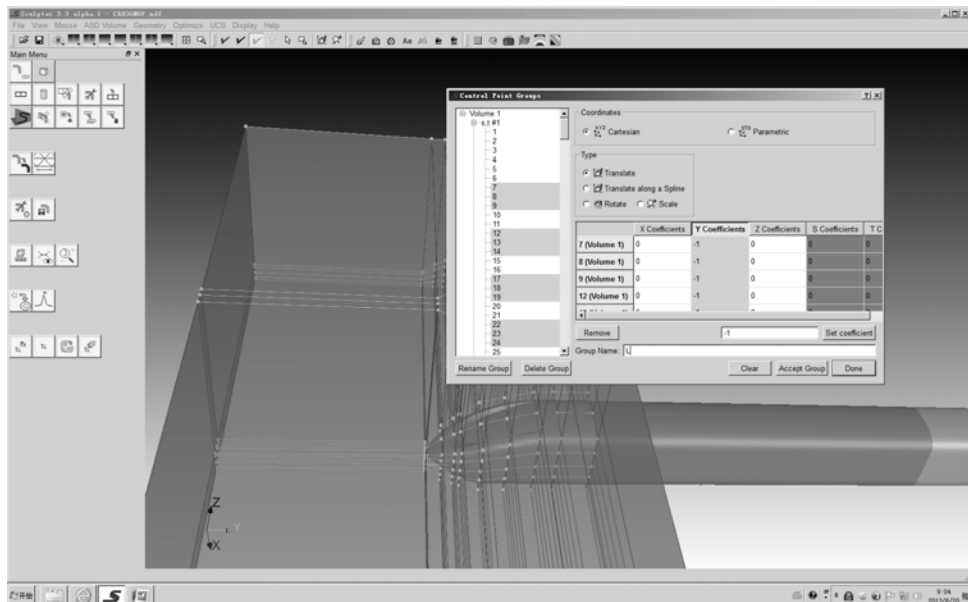


图 9−14　设置变量 L

13）单击软件右侧图形菜单按钮查看变量的取值范围，弹出新窗口，如图 9−15 所示，选择“Deform Geometry by Custom Groups”>“H”或者“L”，通过调整“P”上的滑块查看模型的变换范围，记录 H 和 L 的变换范围，作为优化过程中变量设置的参考范围范围。单击“OK”按钮确认操作。

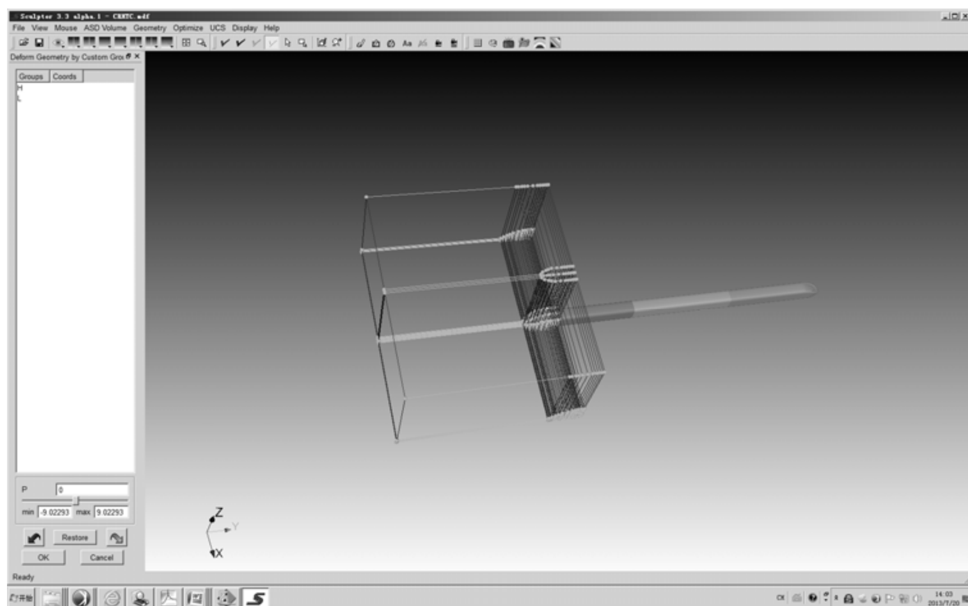


图 9−15　查看变量的范围

14）编写批处理文件，新建“.txt”文件，重新命名为“elbow_sculptor.bat”，文件内容如图 9-16 所示。

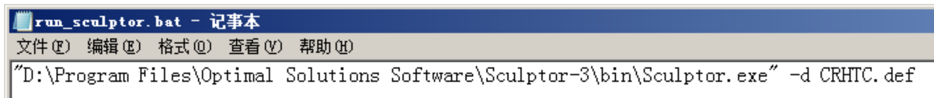


图 9-16　Sculptor 软件批处理文件

9.2.2 ICEM 对网格进行转存

1）启动 ICEM 软件，选择菜单“File”>“Reply Scripts”>“Recording scripts”，启动录制宏文件，将 Sculptor 保存变形后的网格模型导入到 ICEM 中，如图 9-17 所示。

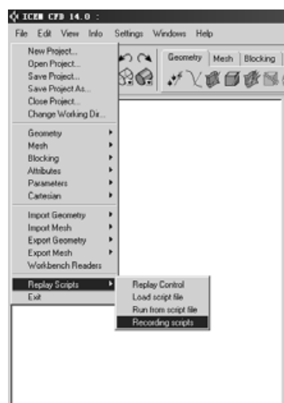


图 9-17　打开录制宏文件

2）将 Sculptor 保存变形后的网格模型导入到 ICEM 中，选择菜单栏“File”>“Import Mesh”>“From Fluent”，打开文件名“CRHTC.cas”读取网格，如图 9-18 所示。

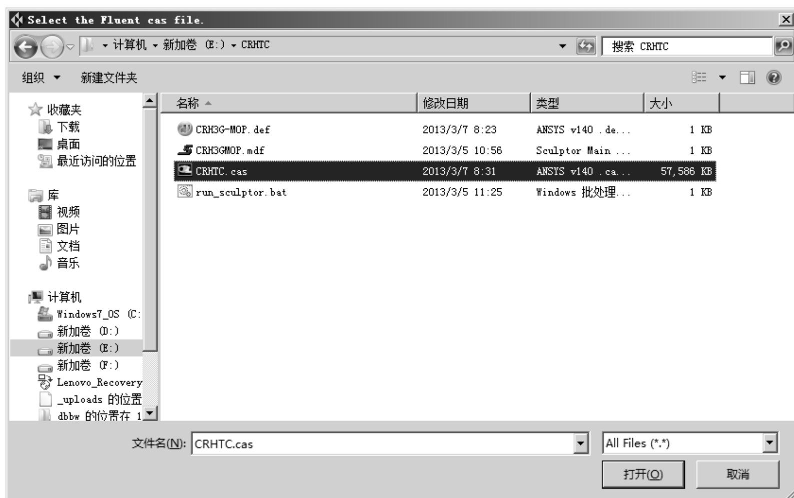


图 9-18　读取变形后的模型文件

3）单击按钮，弹出“Save Project As”对话框，文件名命名为“project1.prj”或其他的名字，单击“保存”按钮确认操作，如图 9-19 所示。



图 9-19　保存.prj 文件

4）单击工具栏“Output”按钮，选择按钮，树形界面下方出现“Output Solver”，选择“FluentV6”，单击“Apply”按钮，再单击“OK”按钮确认操作，如图 9-20 所示。

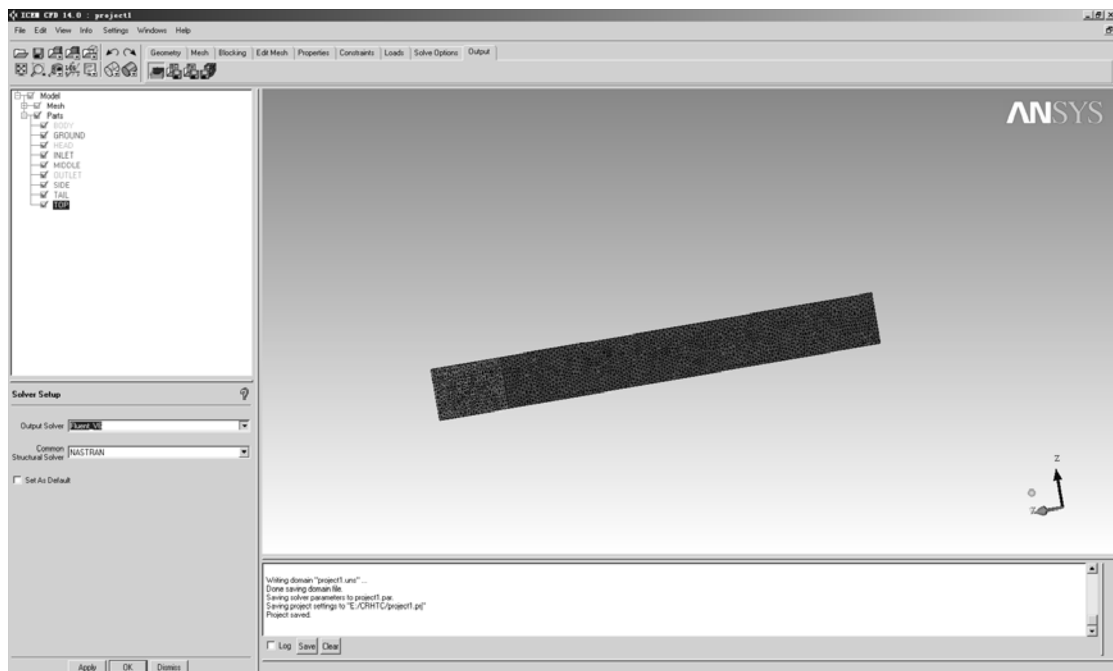


图 9-20　选择网格输出格式

5）单击按钮，弹出“另存为”对话框（见图 9-21），文件名称采用默认，单击“保存”按钮，弹出“Save”对话框，单击“Yes”按钮确认操作，如图 9-22 所示。

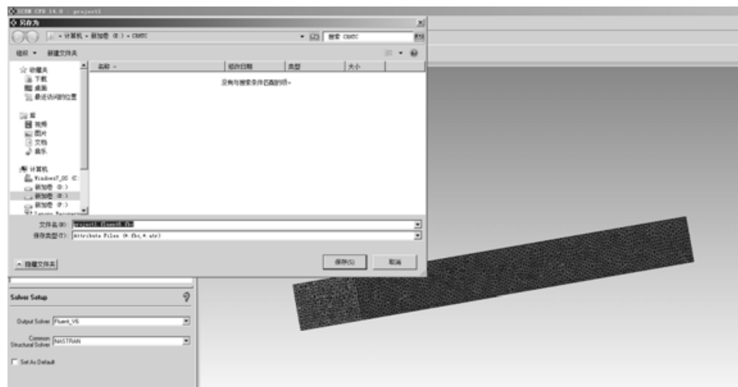


图 9-21　打开体网格文件



图 9-22　保存 project 文件

6）弹出“打开”对话框，默认文件名，单击“打开”按钮，弹出“Fluent V6”对话框，如图 9-23 所示。

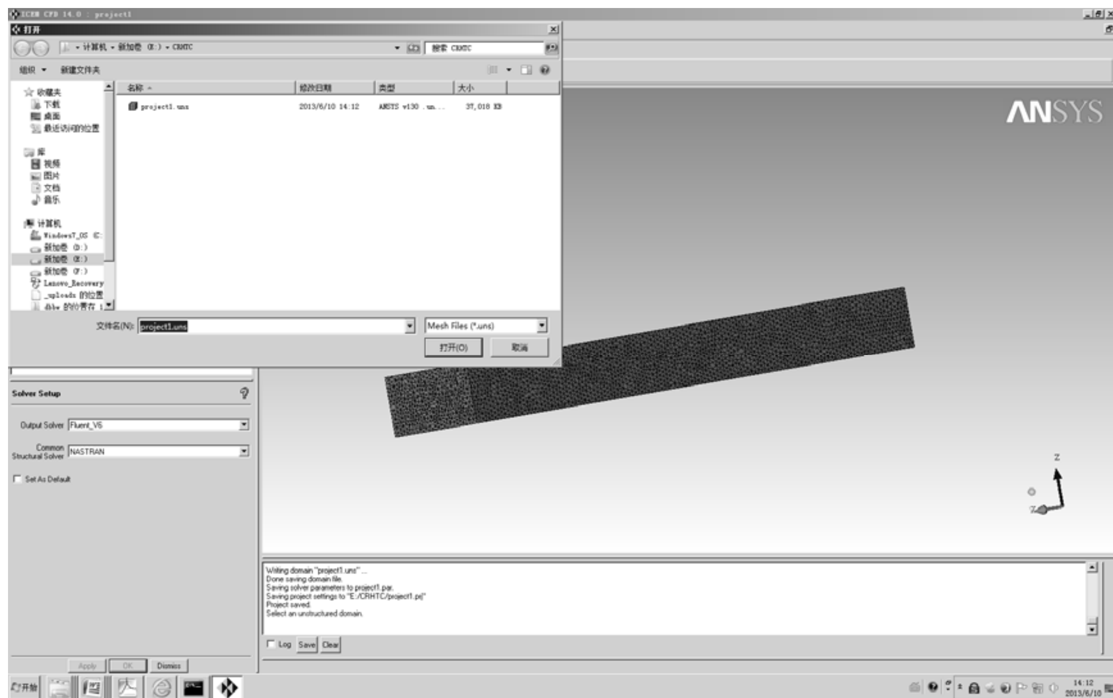


图 9-23　选择对应的“preject1.uns”文件

7）在“Fluent V6”对话框中输入文件名“fluent”，如图 9-24 所示。

8）单击“Done”按钮确认保存。查看保存路径，可以找到网格文件“CRHTC.msh”。

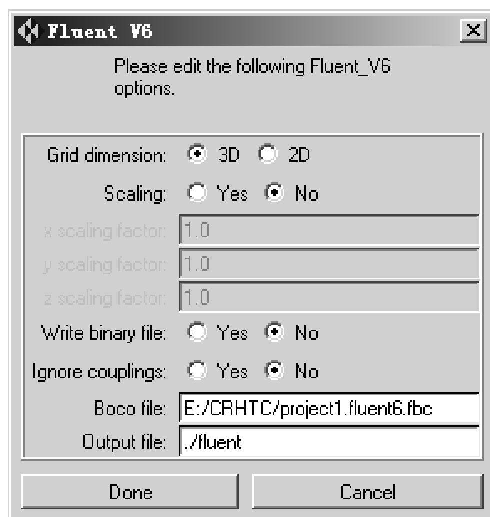


图 9-24　输入文件名

9）选择菜单栏“File”>“Exit”，弹出“Save Script File”对话框，单击“保存”按钮，如图 9-25 所示。



图 9-25　保存宏文件

10）弹出“Save”对话框，单击“Yes”按钮，退出软件 ICEM，如图 9-26 所示。



图 9-26　Save 对话框

9.2.3 流体计算软件 FLUENT 对高速列车进行计算

1）通过“开始”菜单启动 FLUENT 软件，如图 9-27 所示。

2）启动 FLUENT 软件，在“FLUENT Launcher”对话框中选择 3D 二维计算模式，激活“Double Precision”双精度模式，选择“Parallel （Local Machine）”选项，在“Number of Processes”选择 “8”，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-28 所示。



图 9-27　启动 FLUENT 软件图

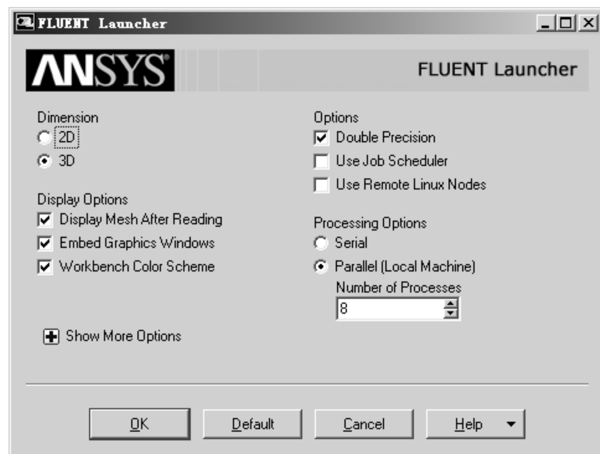


图 9-28　选择并行计算方式

3）选择菜单栏“File”>“Journal…”，弹出“Select File”对话框（见图 9-29），将“Journal File”命名为“CRHTC.jou”，单击“OK”按钮确认操作。



图 9-29　打开录制宏文件

4）选择菜单项“File”>“Read”>“Mesh... ”，导入网格，如图 9-30 所示。

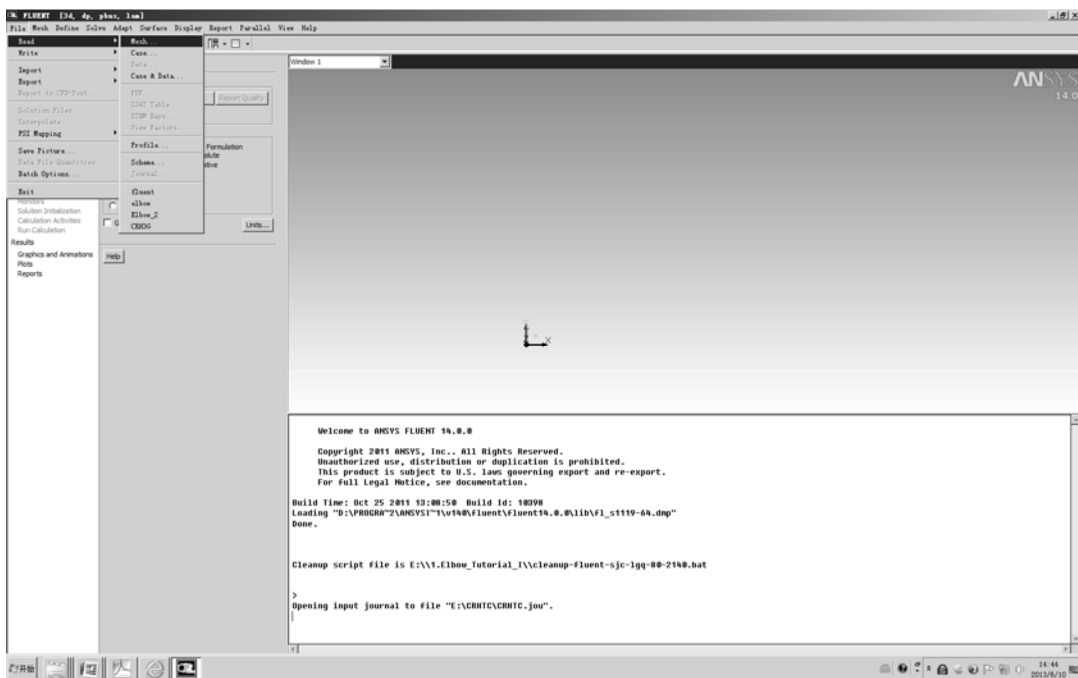


图 9-30　导入网格

5）选择网格文件“CRHTC.msh”，单击“OK”按钮打开该网格文件，如图 9-31 所示。

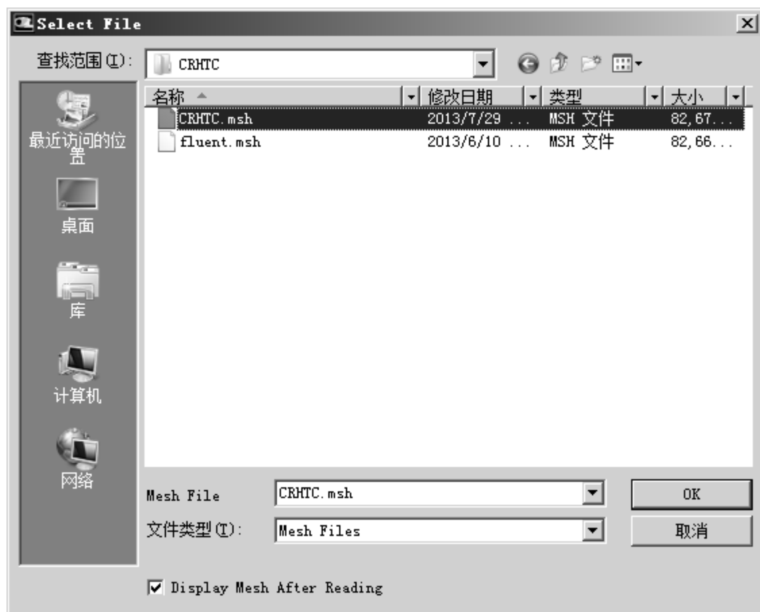


图 9- 31　选择网格文件

6）选择菜单项“Display”>“Mesh...”，打开“Mesh Display”对话框，如图 9-32 所示。单击“Mesh Display”对话框中的“Display”按钮，视图区出现计算模型的网格。可以

看到，软件将进口处显示为蓝色，将出口处显示为红色，单击“Close”按钮退出。

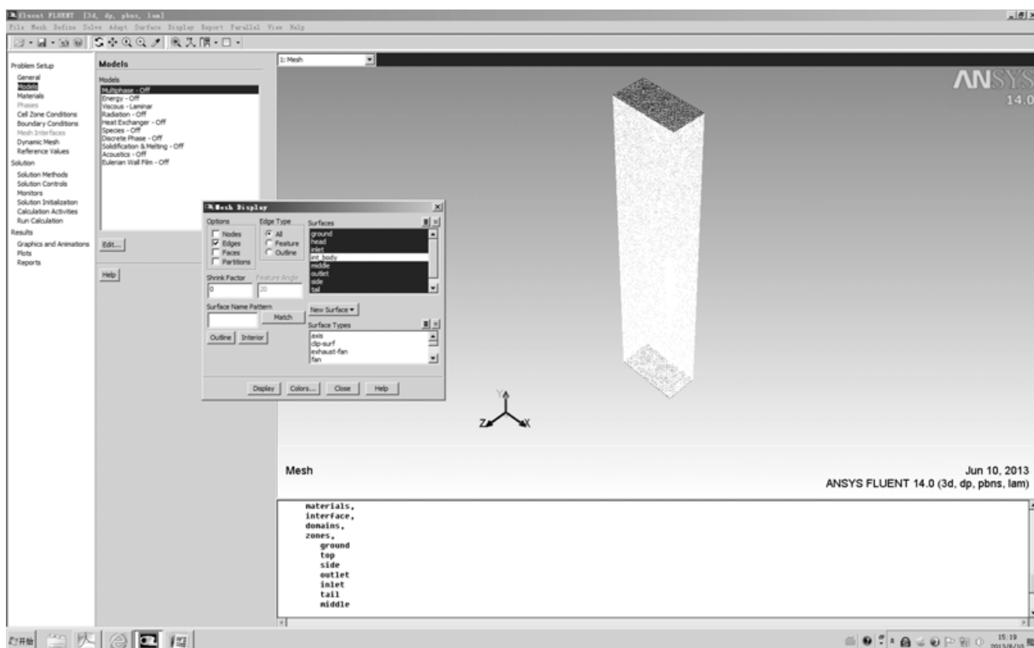


图 9-32　显示网格

7）默认选择“Problem Setup”>“General”项属性栏中的各项设置。

8）更改湍流模型。选择“Problem Setup”>“Models”项，双击其属性栏中的“Viscous-Laminar”项，如图 9-33 所示。

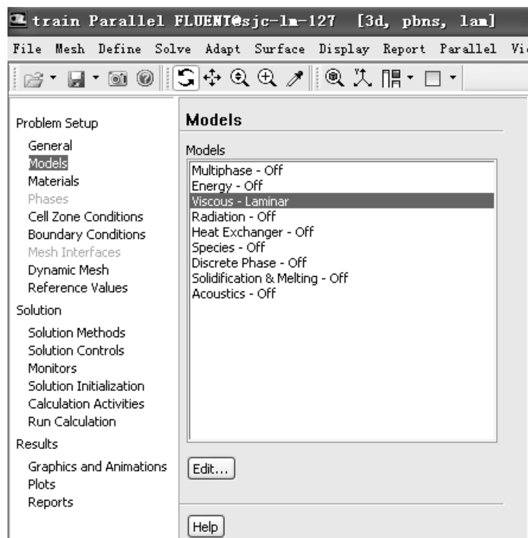


图 9-33　更改湍流模型

9）在打开的“Viscous Model”对话框中选择“k-epsilon（2 eqn）”项，对话框展开为图 9-34 所示的形式。保持默认设置，单击“OK”按钮返回。

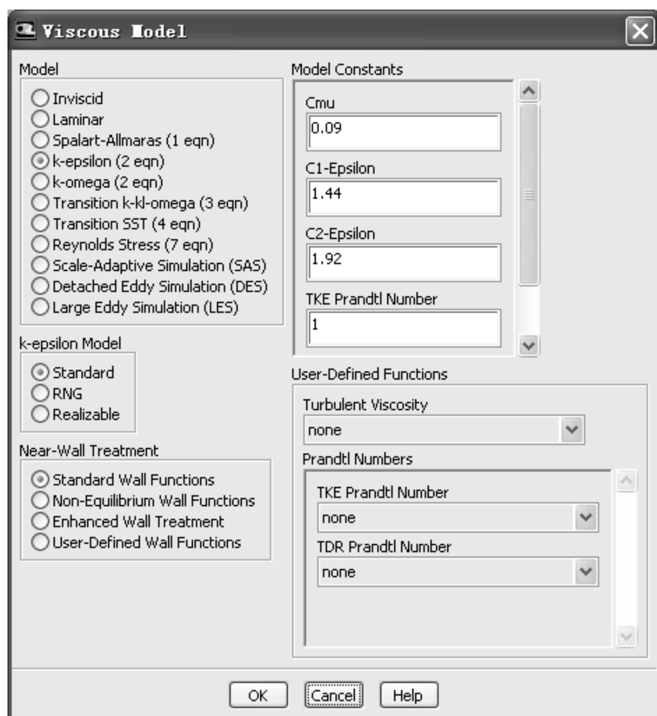


图 9-34 选择“k-epsilon(2 eqn)”模型

10）保持“Problem Setup”>“Materials”和“Problem Setup”>“Cell Zone Conditions”两项属性栏设置不变。

11）选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“inlet”边界，软件默认其为“velocity-inlet”条件。单击“Edit...”按钮，在弹出的“Velocity Inlet”对话框中输入速度值为“69.44”，如图 9-35 所示。单击“OK”按钮退出。

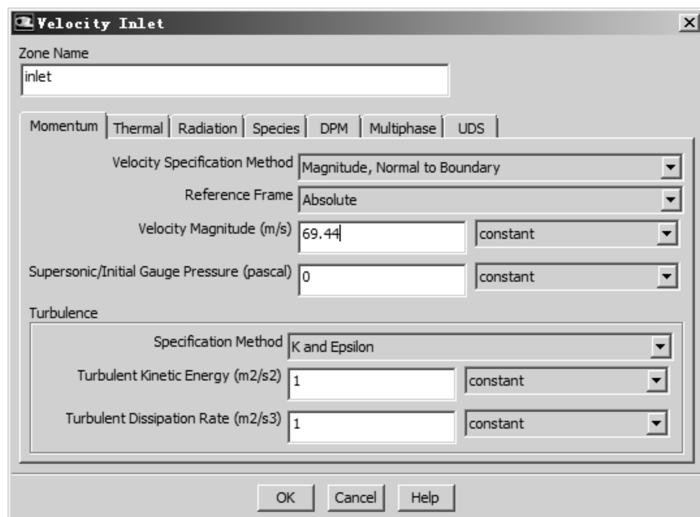


图 9-35 输入入口速度

12）选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“outlet”边界，将其设置为“Pressure Outlet”条件。在图 9-36 所示的“Pressure Outlet”对话框中保持默认设置，然后单击“OK”按钮返回。

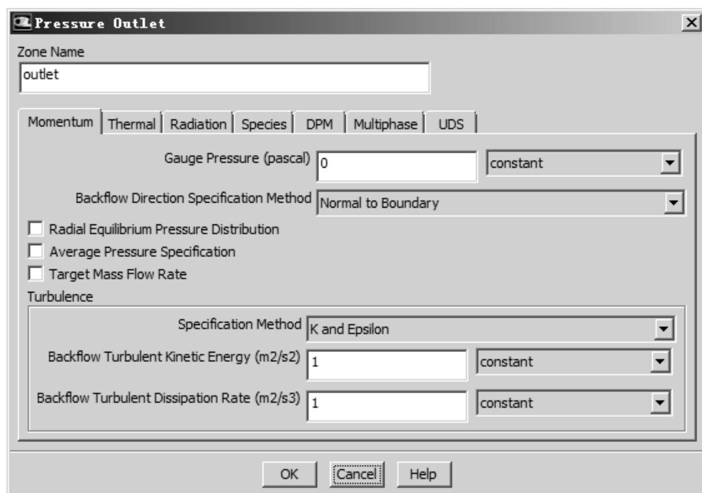


图 9-36　设置出口条件

13）选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“side”,“top”边界，将其设置为“wall”条件。在如图 9-37 所示的“Wall”对话框中选择“Specified Shear”项并设置“Roughness Constant”值为“0”，然后单击“OK”按钮返回。

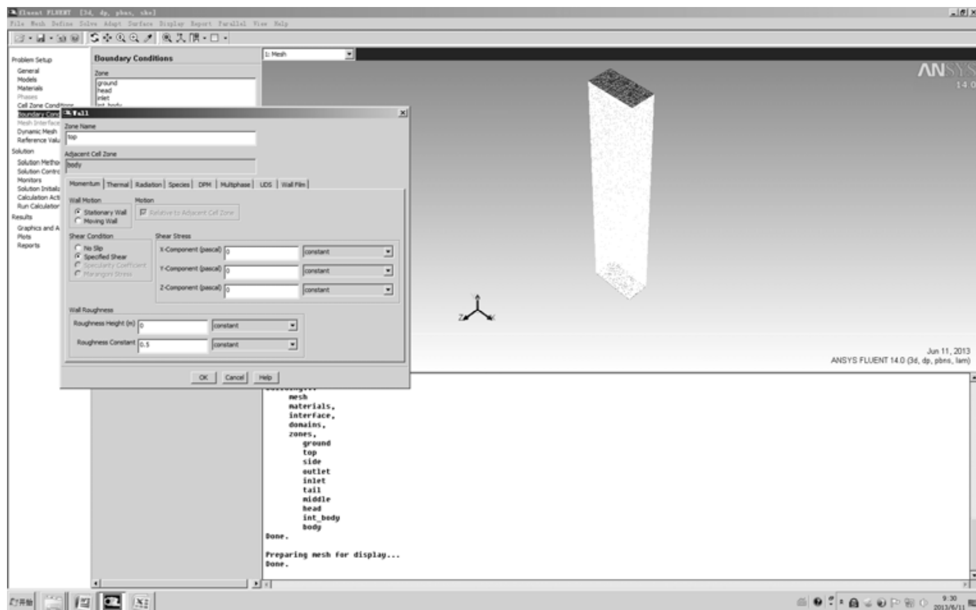


图 9-37　设置计算域壁面条件

14）选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“ground”边界，将其设置为“wall”条件。在图 9-38 所示的“Wall”对话框中选择“Moving Wall”项，默认选

择“Translational”方式，并设置“Speed（m/s）”为“69.44”，设置“Direction”值为“0，1，0”，单击“OK”按钮返回。

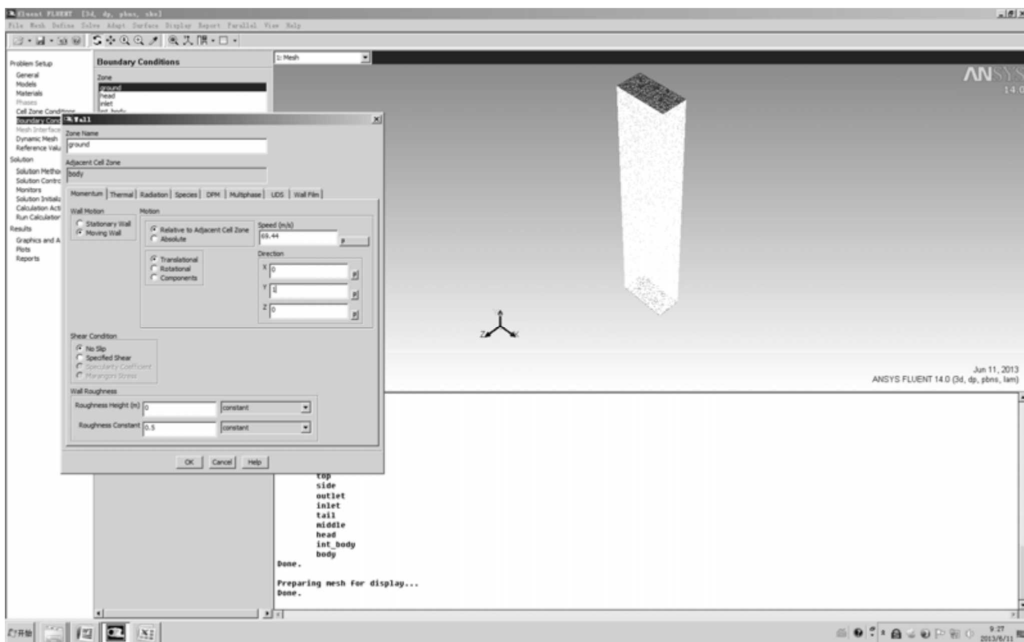


图 9-38　设置地面滑移条件

15）选择“Problem Setup”>“Boundary Conditions”项属性栏的“head”，“middle”，“tail”边界，将其设置为“wall”条件。在图 9-39 所示的“Wall”对话框中选择“No Slip”项，保持默认设置，单击“OK”按钮返回。其余 2 个“middle”，“tail”参考这个设置。

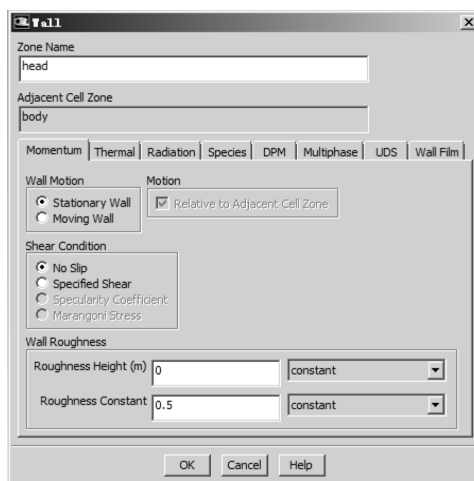


图 9-39　设置列车壁面条件

16）设置列车计算参考数值。选择“Problem Setup”>“Reference Values”，设置“Compute from”项为“inlet”，设置参考值“Area（m^2）”为“12”，设置“Reference Zone”项为“body”，如图 9-40 所示。其余设置默认不变。



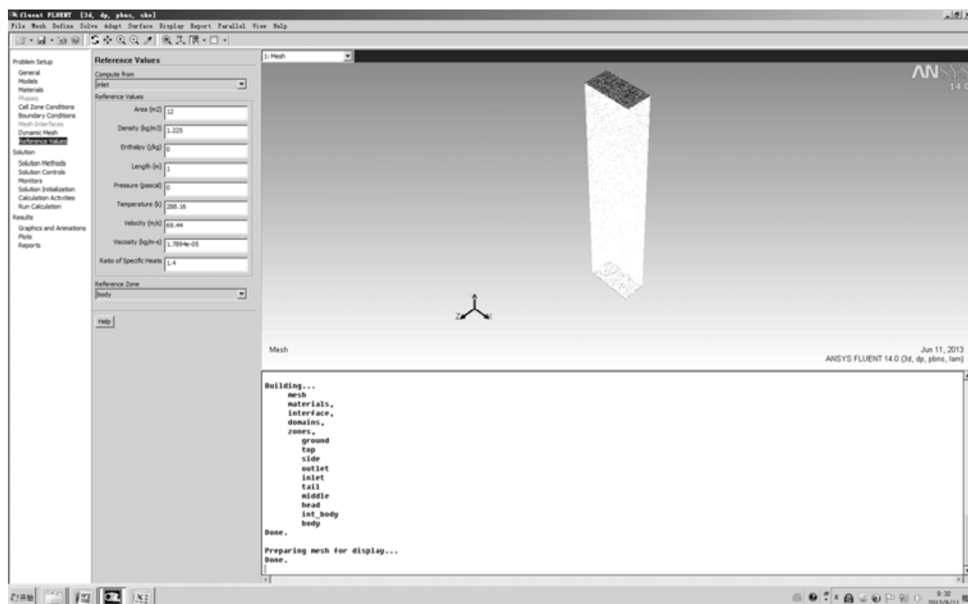


图 9-40　设置列车计算参考数值

17）保持“Solution”>“Solution Methods”和“Solution”>“Solution Controls”两项设置不变。

18）选择“Solution”>“Monitors”项，双击“Residuals”项，打开“Residual Monitor”对话框。将“Equations”栏所有项的“Absolute Criteria”（收敛标准）由 0.001 修改为 0.0001，如图 9-41 所示。

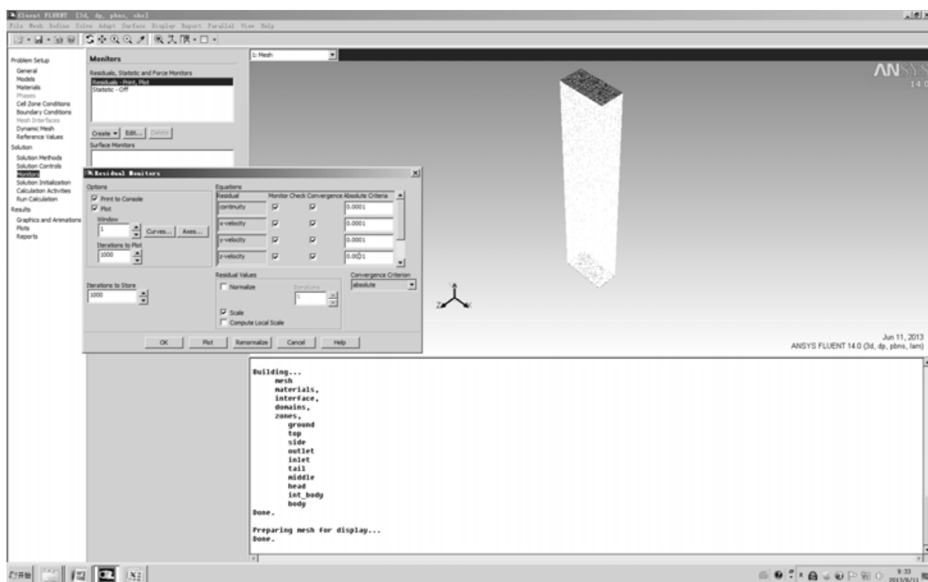


图 9-41　修改收敛标准

19）选择“Create”>“Drag”项，打开对话框“Drag Monitor”，window 编号自动设置为 2（残差曲线窗口编号默认为 1）。勾选“Plot”项，选择“Wall Zone”栏“head、

middle、tail”项，同时将“Force Vector”设置为“0，1，0”，即监测列车明线运行所受阻力。单击“OK”按钮返回，如图 9−42 所示。

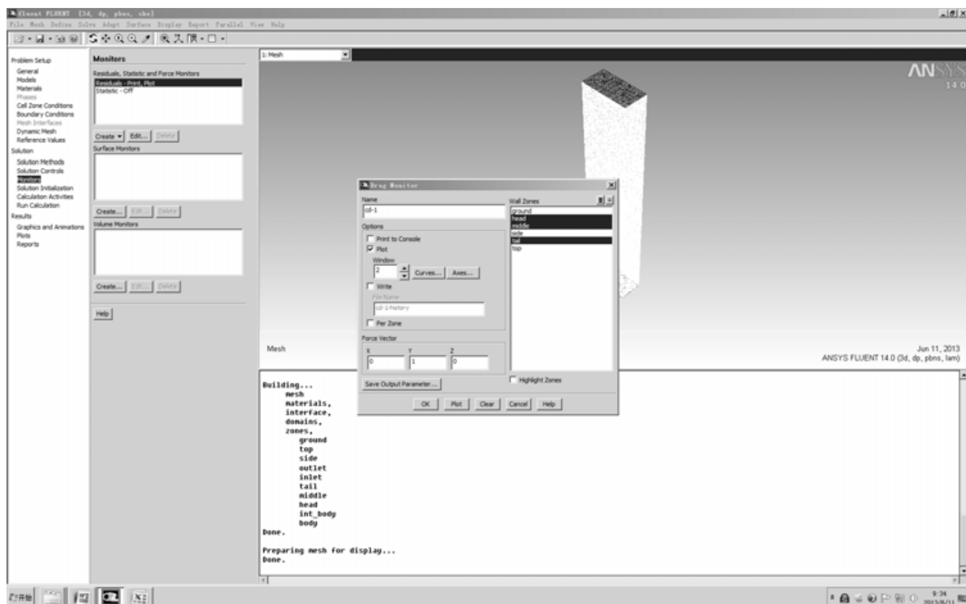


图 9−42 列车 cd 设置

20）设置气动升力监测曲线。选择“Create”>“Drag”项，打开对话框“Drag Monitor”，window 编号自动设置为 3。选择“Wall Zone”栏“head、middle、tail” 边界，同时将“Force Vector”设置为“0，0，1”，即监测列车明线运行所受升力。单击“OK”按钮返回，如图 9−43 所示。

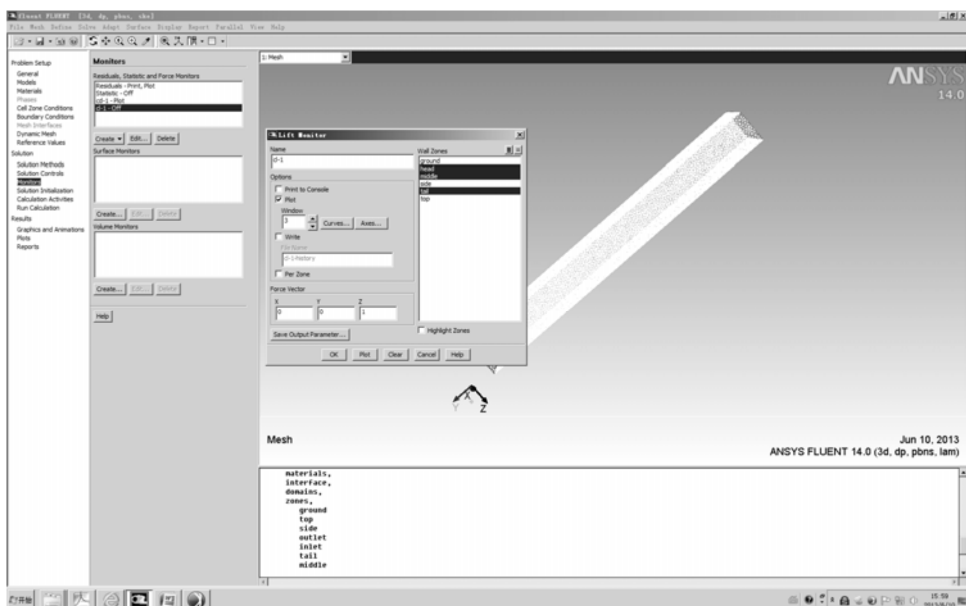


图 9−43 列车 cl 设置

21）选择“Solution”>“Solution Initialization”项，将其属性栏“Compute from”项设置为“inlet”边界，其余设置不变，如图 9-44 所示。单击“Initialize”按钮，进行计算项目的初始化。

22）保持“Solution”>“Calculation Activities”项设置不变。

23）设置迭代步数。选择“Solution”>“Run Calculation”项，将其属性栏中“Number of Iterations”项设置为“5”，如图 9-45 所示。

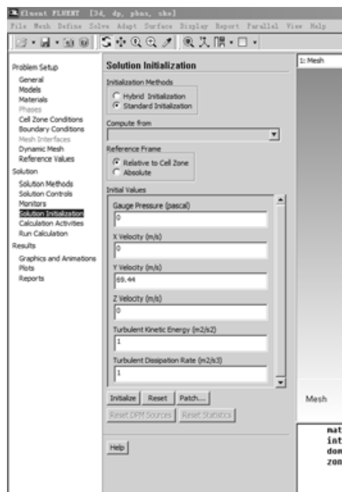


图 9-44　初始化计算项目

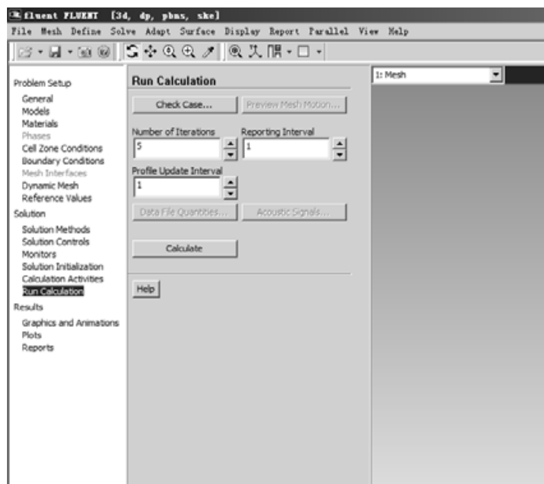


图 9-45　设置迭代步数

24）单击“Calculate”按钮，进行计算。图 9-46 所示为残差曲线图。

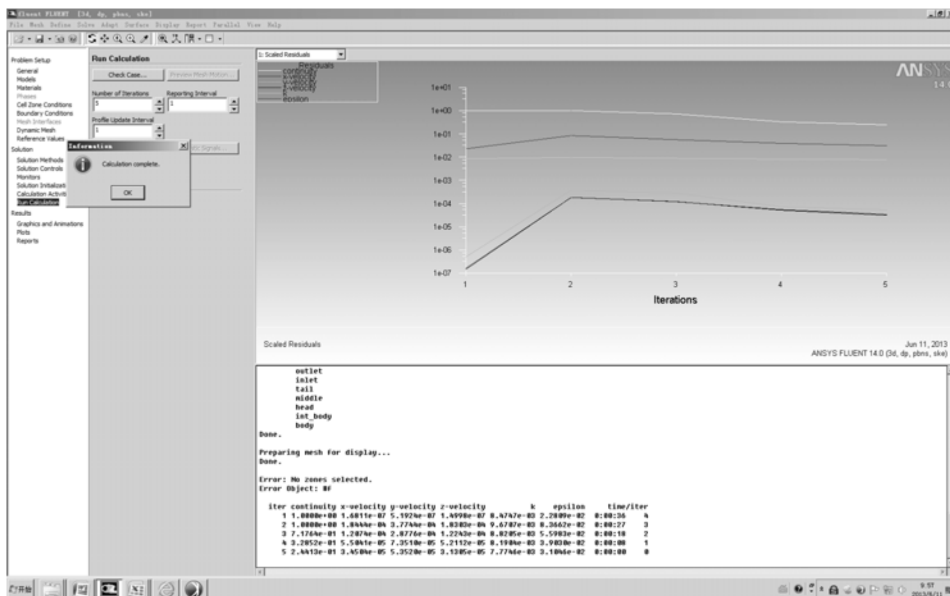


图 9-46　残差曲线图

25）计算完成后，“Information”对话框显示计算完成的信息。单击“OK”按钮确认。

26）计算列车所受气动阻力。选择“Results”>“Reports”项，双击右侧的“Forces”项，出现“Force Reports”对话框。默认选择“Options”栏中的“Forces”项，设置“Direction Vector”为“0，1，0”，并选择“Wall Zones”栏中的“head”“middle”“tail”边界，如图9-47所示。

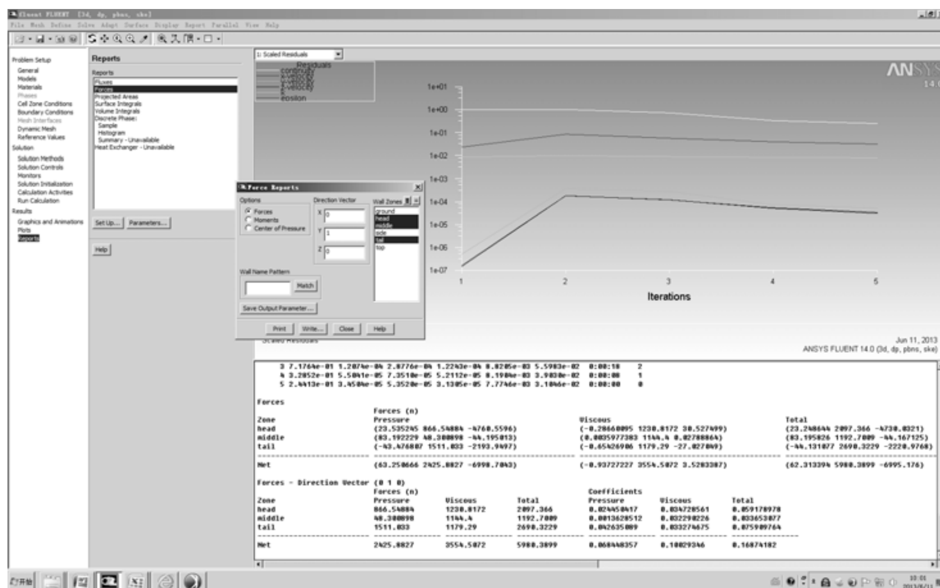


图9-47 计算列车所受气动阻力

27）单击“Write…”按钮，打开“Select File”对话框（见图9-48）。在“Force Report”项输入文件名称“Drag”，单击“OK”按钮确认操作。

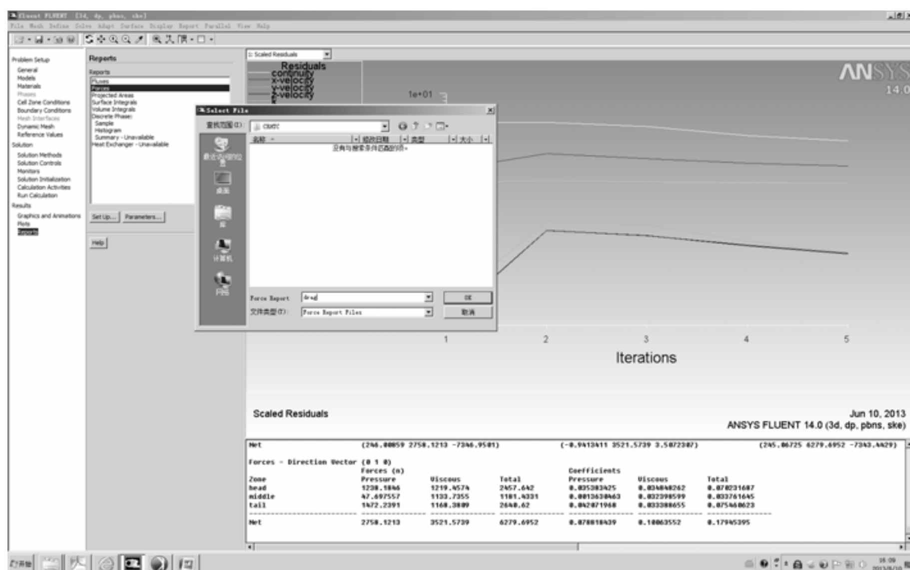


图9-48 输出气动阻力结果

28）计算列车所受气动升力。保持其他设置不变，将“Forces”项的“Direction Vector”设置为“0，0，1”，并选择“Wall Zones”栏中的“head”“middle”“tail”边界，如图 9-49 所示。

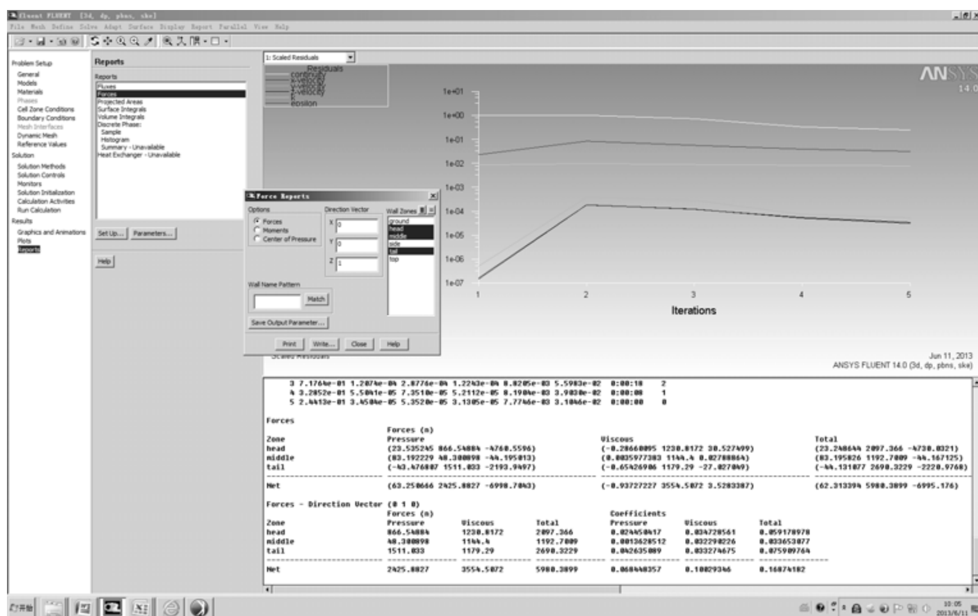


图 9-49　计算列车所受气动阻力

29）单击“Write…”按钮，打开“Select File”对话框。在“Force Report”项输入文件名称“Lift”，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-50 所示。

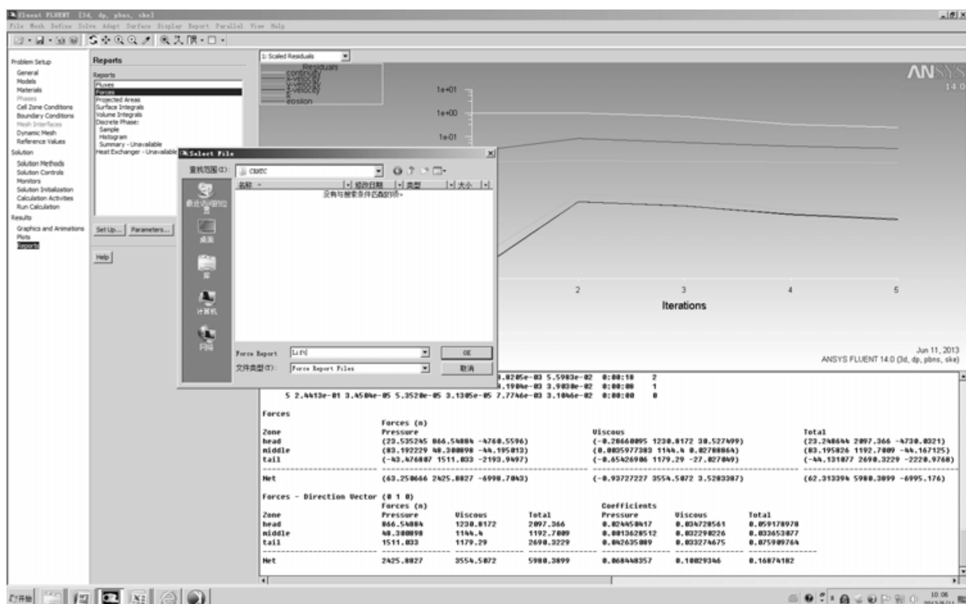


图 9-50　输出气动升力结果

30）选择菜单栏“File”>“Exit”，弹出“Question”对话框，单击“OK”按钮，如图9−51所示。

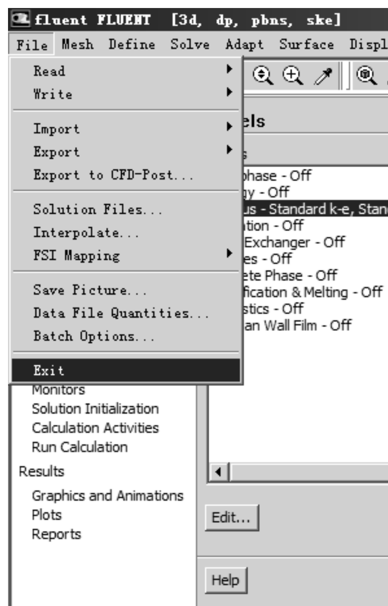


图 9−51　退出 Fluent 软件

9.2.4 Isight 对各个软件进行集成及 DOE 计算

1）启动 Isight 软件，选择“开始”菜单栏“Isight5.5”>“Design Gateway”，打开 Isight 5.5，任务窗口默认任务“Tsak1”，如图 9−52 所示。

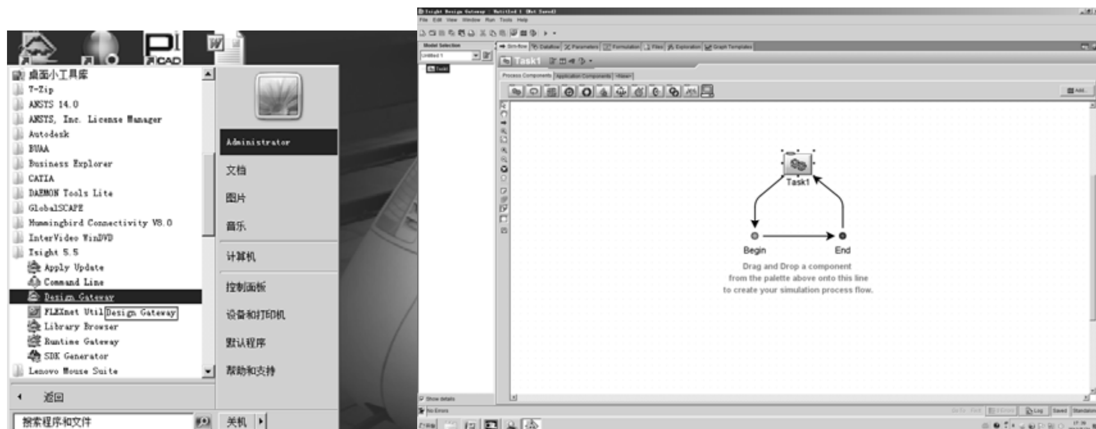


图 9−52　启动优化软件 Isight

2）选择任务窗口“Sim-flow”>“Application Components”，选择“Simcode”组件，将按钮拖曳至“Task1”中，如图 9−53 所示。

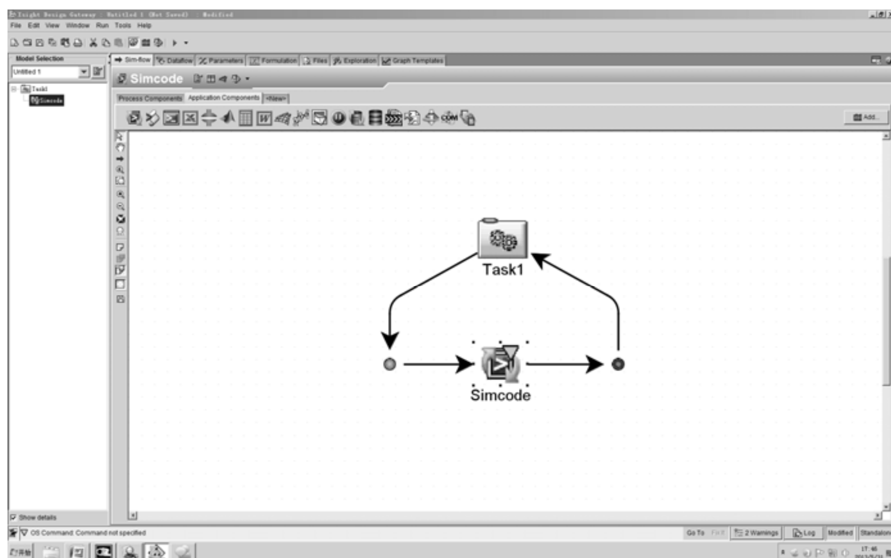


图 9-53　创建 Simcode 工作流

3）右键选中“Simcode”后再选中“Rename”，弹出“Rename Component”对话框（见图 9-54），在对话框中输入“sculptor”，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-55 所示。

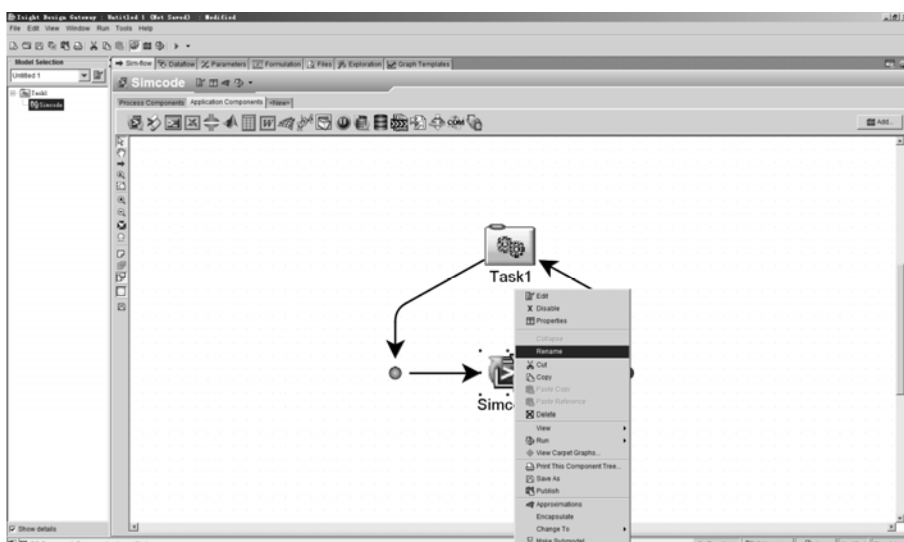


图 9-54　Rename 命令



图 9-55 “Simcode”命名为“sculptor”

4）双击“sculptor”，弹出“Component Editor-Simcode”对话框，选择对话框中的“Command”>“Basic”>“Find Program…”，弹出对话框“Select Program”，选择文件“run_sculptor.bat”，单击“打开”按钮确认操作，如图 9-56 所示。

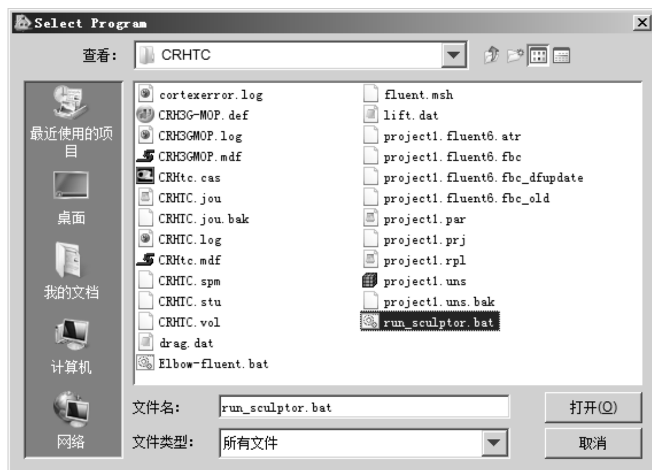


图 9-56　打开 sculptor 启动文件

5）切换至“Advanced”属性窗口，将“Execution takes longer than”“There is output the Standard Error stream”复选项前的☑勾选掉，如图 9-57 所示。

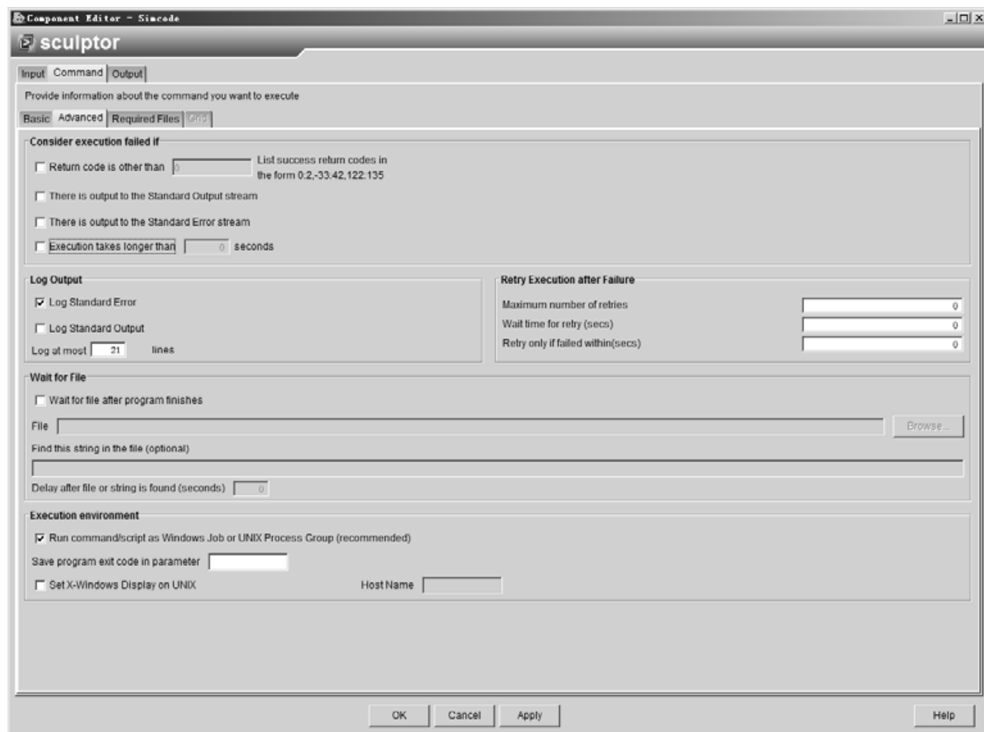


图 9-57　取消计算限制时间



6）切换到“Input”属性窗口，如图 9-58 所示。在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”按钮，弹出对话框“Exchanger Wizard”默认选项，如图 9-59 所示。

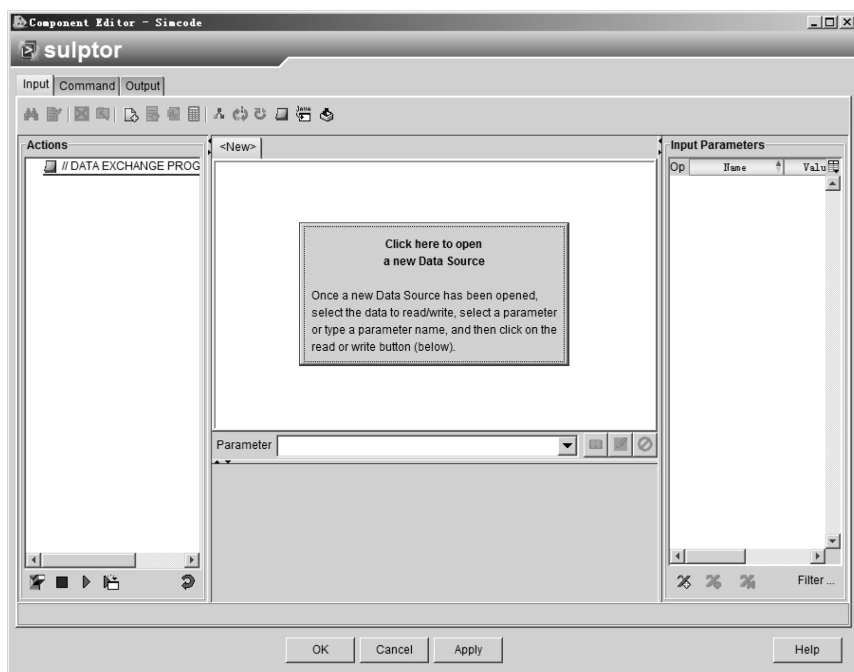


图 9-58　Simcode Input 界面

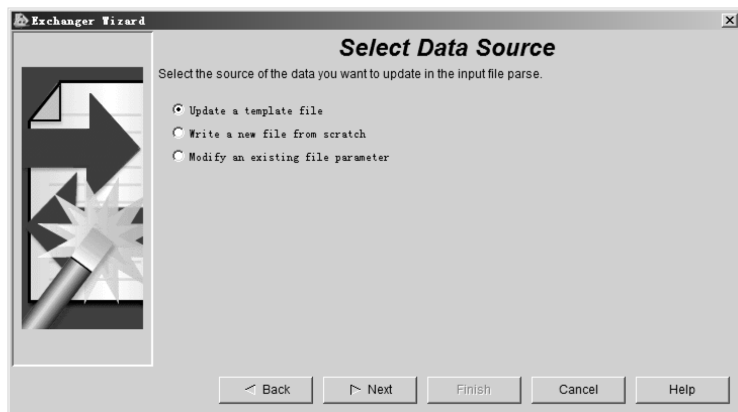


图 9-59　Update a template file 单选项

7）在弹出的“Select Data Source”界面中选择“Update a template file”选项，单击“Next”按钮进行下一步。

8）在弹出的“Select Template File”界面中单击“Browse”按钮，选择“CRHTC.def”，单击“打开”按钮确认操作，然后单击“Next”按钮，如图 9-60 所示。

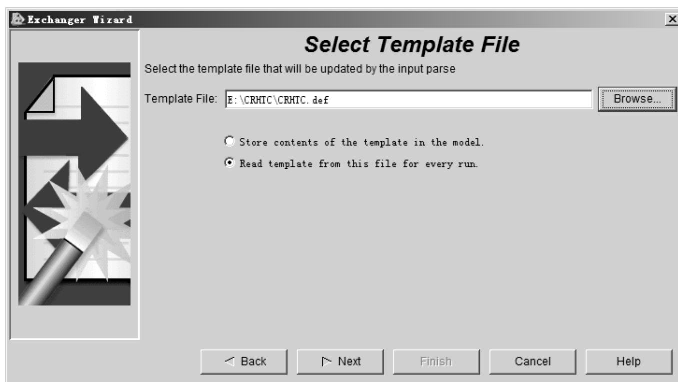


图 9-60　选择写入文件

9）在弹出的“Select Local File Name”界面中继续单击“Next”按钮，如图 9-61 所示。



图 9-61　Select Local File Name

10）在弹出的“File Format”界面中选择“General Text”选项，如图 9-62 所示。单击“Finish”按钮，返回“Component Editor”对话框。

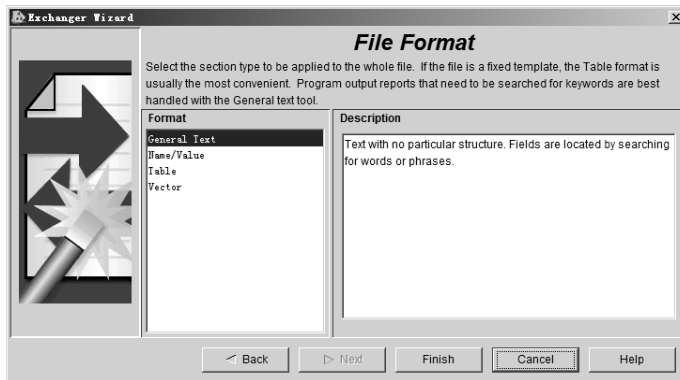


图 9-62　File Format 界面

11）单击“CRHTC.def”数据区中的第二行显示“-0.2”字符串，在“Parameter”文本框后输入名称“H”参数名，单击“写入”按钮，此时“-0.2”背景变为粉红色。左侧

“Actions”和右侧“Input Parameters”将分别显示，如图 9-63 所示。

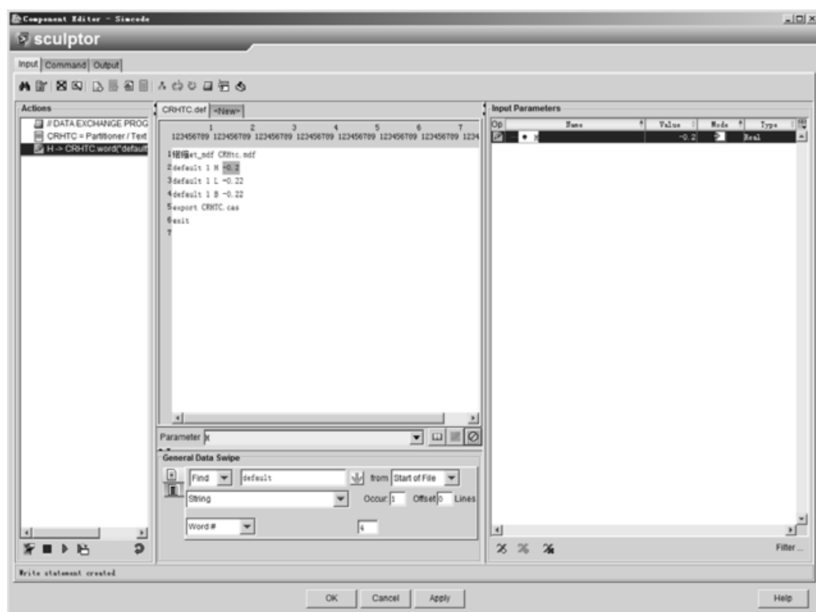


图 9-63　定义变量 H 名

12）单击“CRHTC.def”数据区中的第三行显示“−0.22”字符串，在“Parameter”文本框后输入名称“L”参数名，单击“写入” 按钮，此时“−0.22”背景变为粉红色。左侧“Actions”和右侧“Input Parameters”将分别显示，如图 9-64 所示。

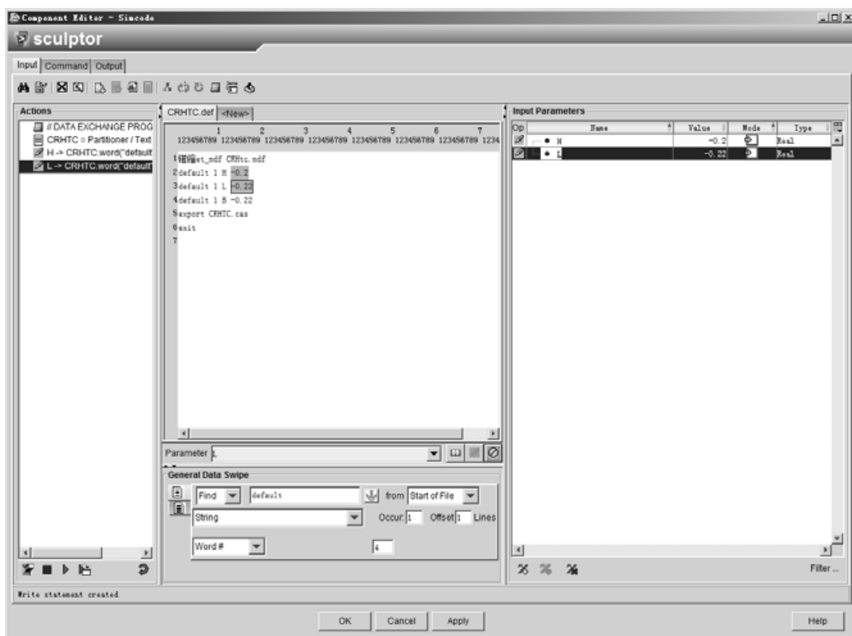


图 9-64　定义变量 L 名

13）选择任务窗口“Sim-flow”>“Application Components”，选择“Simcode”组件，将按钮拖曳至“Task1”中，右键单击“Simcode”>“Rename”，弹出“Rename Component”对话框，在对话框中输入“ICEM”，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-65 所示。

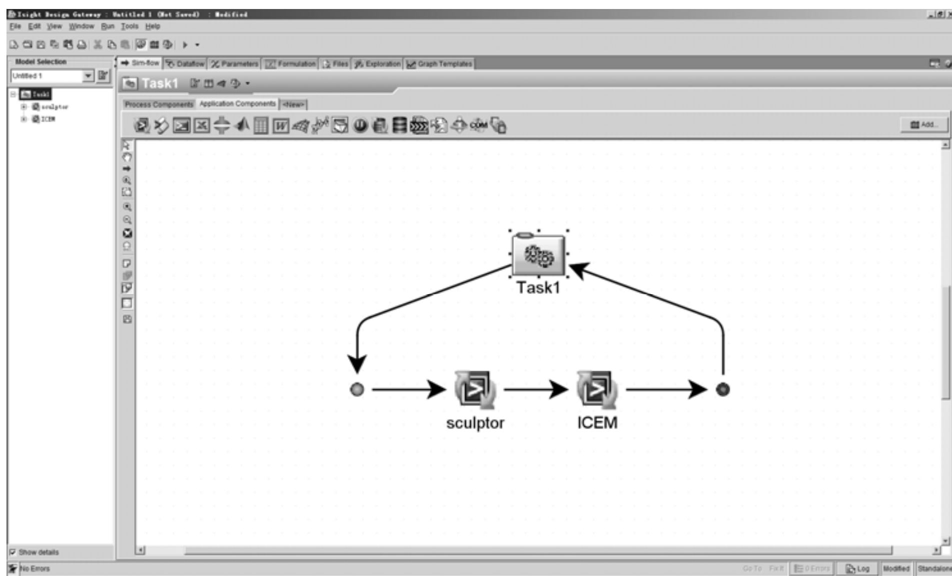


图 9-65 创建 ICEM 流程

14）双击“ICEM”，弹出“Component Editer-Simcode”对话框，选择对话框中的“Command”>“Basic”>“Find Program…”，弹出“Select Program”对话框，选择文件“ICEM CRHTC.bat”，单击“打开”按钮确认操作，如图 9-66 所示。

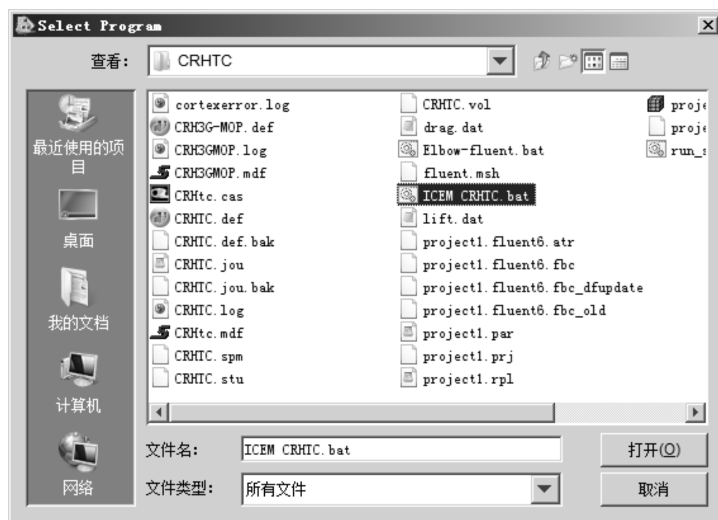


图 9-66 打开启动 ICEM 软件文件

15）切换到“Command”属性窗口，单击“Advanced”按钮，将“Execution takes

longer than”前的☑勾选掉，如图 9-67 所示。

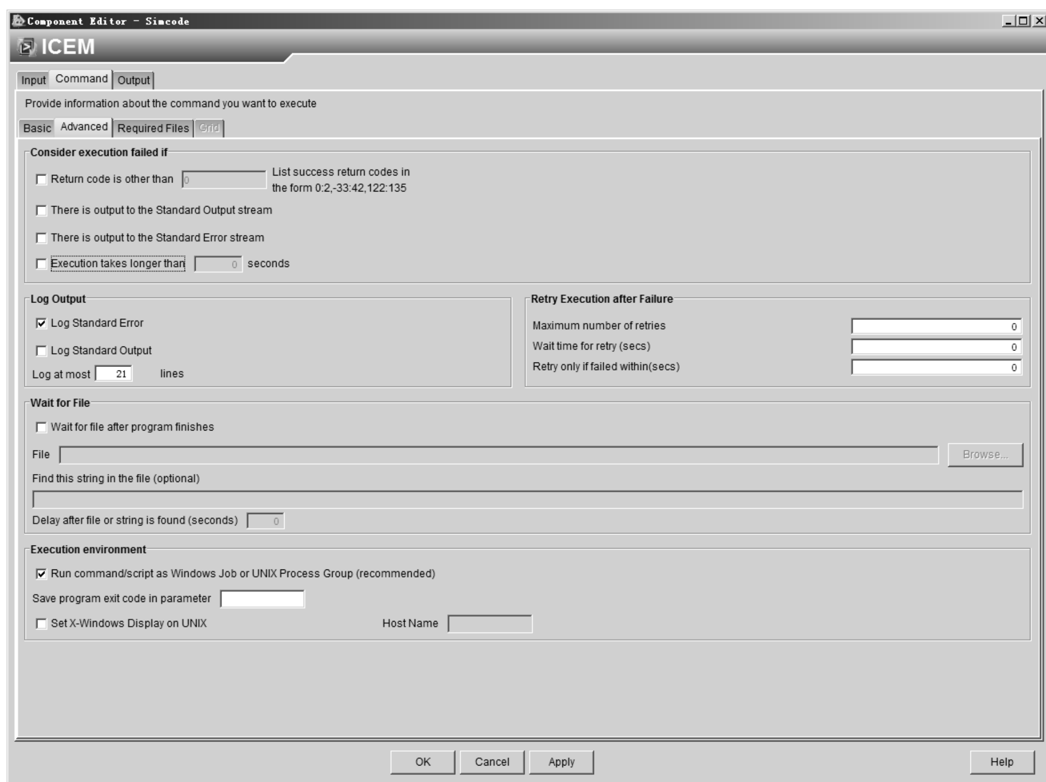


图 9-67　取消计算限制时间

16）切换到“Input”属性窗口，在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”，弹出对话框“Exchanger Wizard”默认选项，单击“Next”按钮进行下一步，单击“Browse”按钮，选择“project1.rpl”，单击“打开”按钮，如图 9-68 所示。单击“Next”按钮，默认选项，单击“Finish”按钮结束操作，完成宏文件读入，如图 9-69 所示。

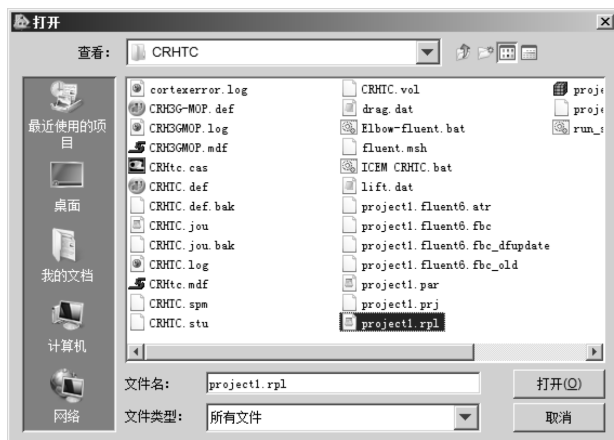


图 9-68　打开 ICEM 软件宏文件

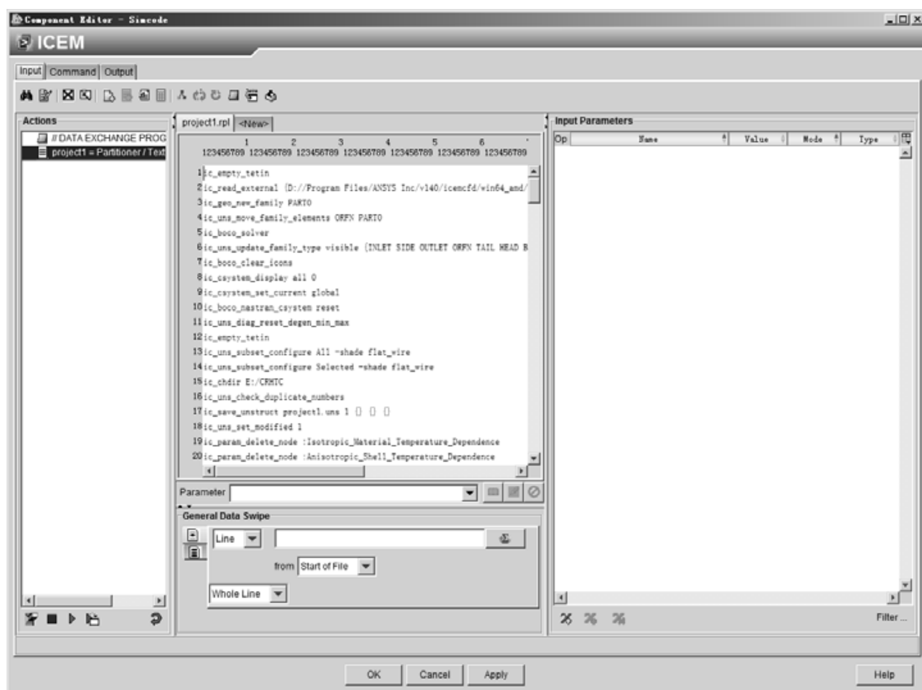


图 9-69　读入宏文件后界面

17）选择任务窗口“Sim-flow”>“Application Components”，选择“Simcode”组件，将按钮拖曳至“Task1”中。右键单击“Simcode”>“Rename”，弹出“Rename Component”对话框，在对话框中输入“fluent”，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-70 所示。

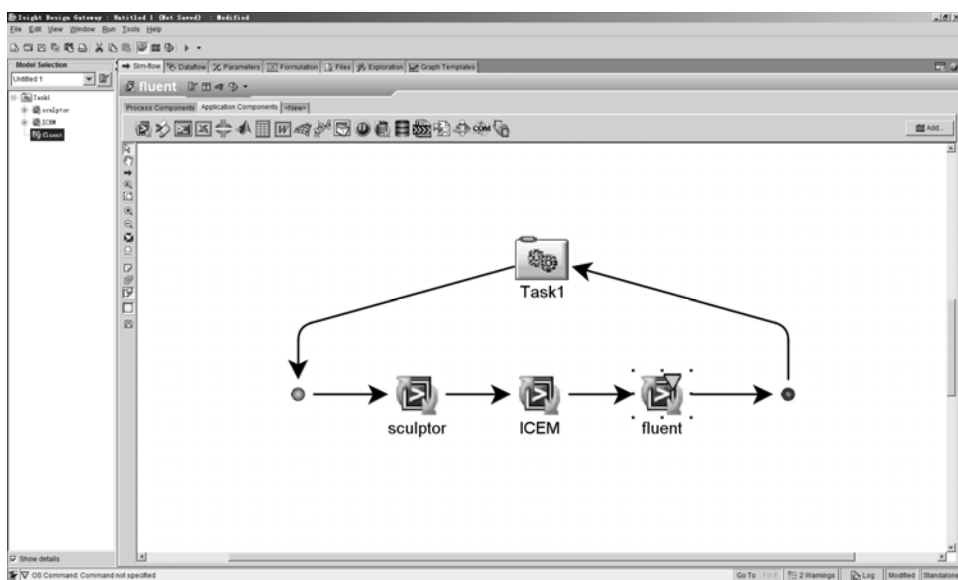


图 9-70　创建 fluent 软件流程



18）双击“fluent”，弹出“Component Editer-Simcode”对话框，切换“Command”属性窗口，选择对话框中的“Command”>“Basic”>“Find Program…”，弹出“Select Program”对话框，选择文件“CRHTC-fluent.bat”，单击“打开”按钮确认操作，如图 9-71 所示。切换至“Advanced”属性窗口，将“Execution takes longer than”“There is output to the Standard Error stream”复选框前的☑勾选掉，如图 9-72 所示。



图 9-71　打开启动 Fluent 软件文件

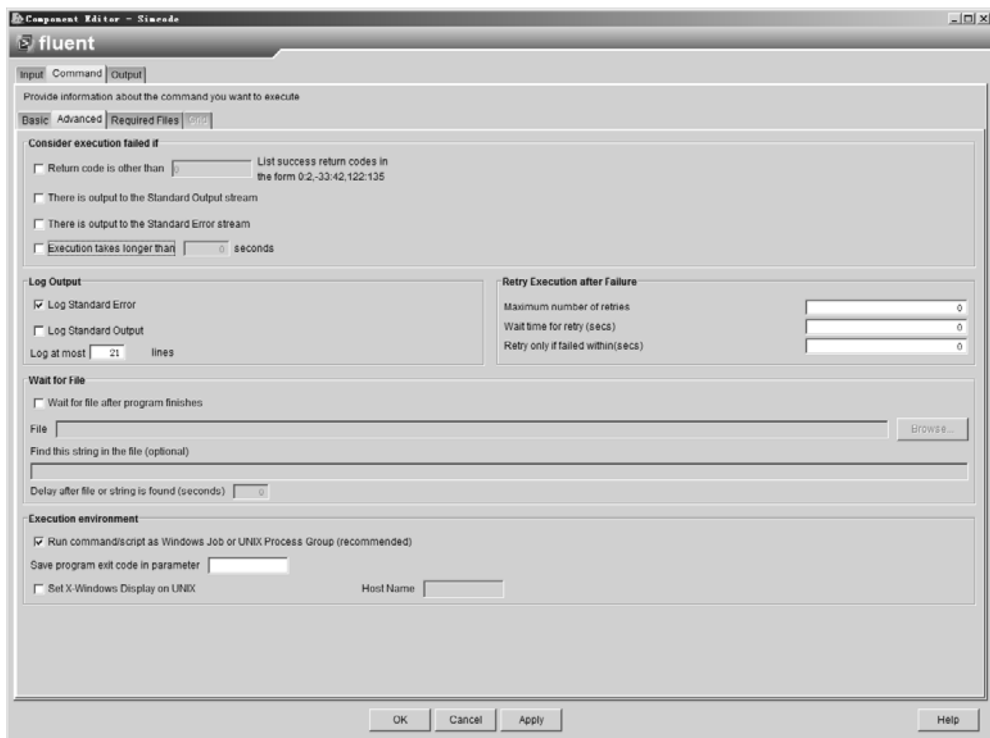


图 9-72　取消计算限制时间

19）单击“Input”按钮，在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”按钮，弹出“Exchanger Wizard”对话框默认选项，单击“Next”按钮进行下一步，单击“Browse”按钮，选择“CRHTC.jou”，单击“打开”按钮，如图 9-73 所示。单击“Next”按钮，默认选项，单击“Finish”按钮结束操作，如图 9-74 所示。

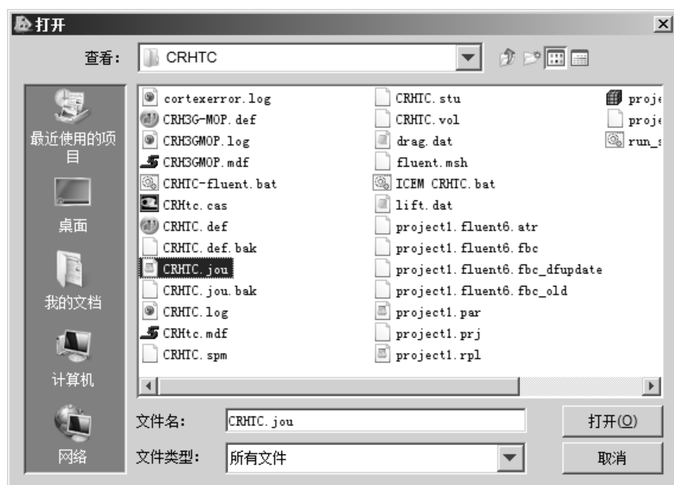


图 9-73　打开 FLUENT 软件宏文件

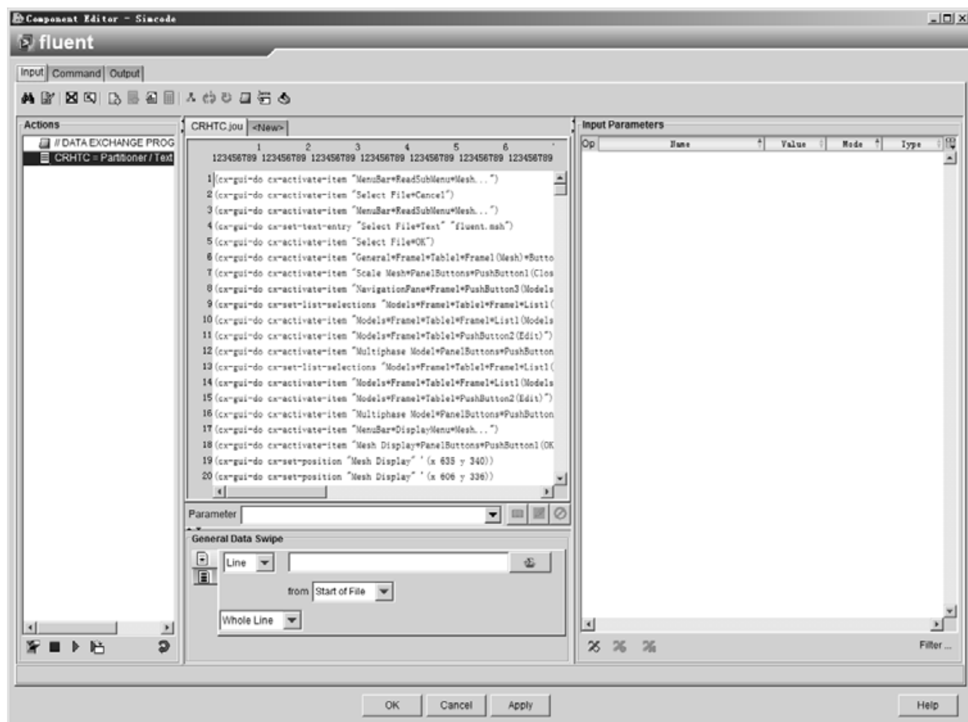


图 9-74　读入宏文件后界面

20）单击“CRHTC.jou”数据区中的“Number of Iterations”后的“5”字符串，在

“Parameter”文本框后输入名称“step”参数名，单击“写入”按钮，此时“5”背景变为粉红色。左侧“Actions”和右侧“Input Parameters”分别显示，如图 9-75 所示。单击“OK”按钮，完成变量命名。

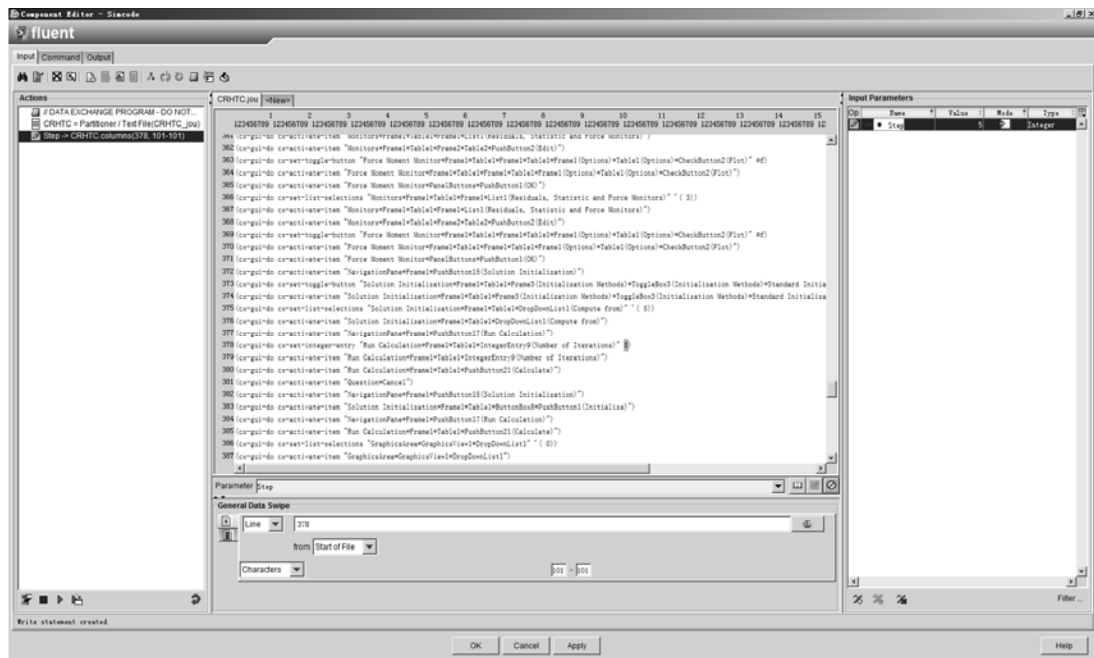


图 9-75　设置变量计算步数

21）切换到“Output”属性窗口，在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”按钮，弹出“Exchanger Wizard”对话框，选择“Sample File”>“Browse…”，选择“lift.dat”，单击“打开”按钮进行下一步，如图 9-76 所示；单击“Next”按钮，默认界面中的选项，单击“Finish”按钮结束操作，如图 9-77 所示。

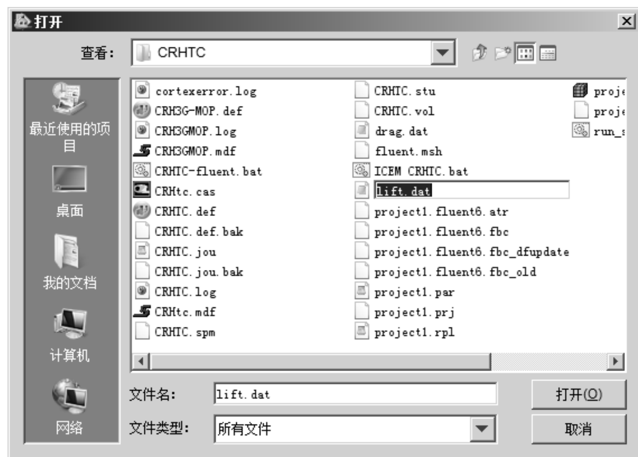


图 9-76　导入 lift 结果文件

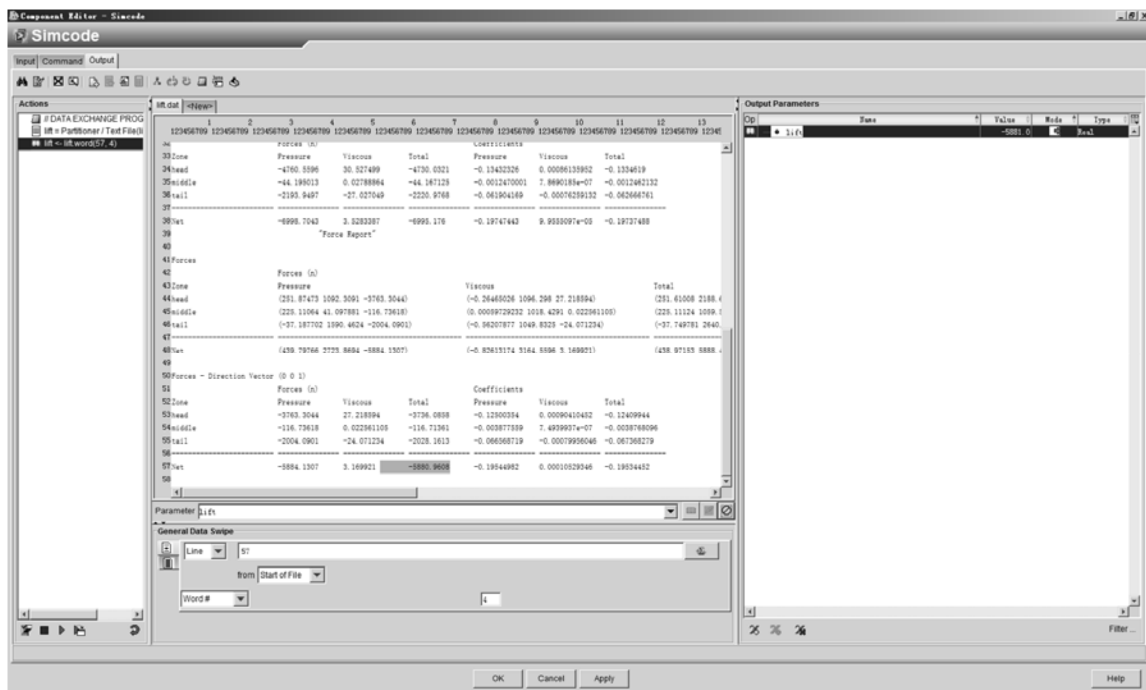


图 9-77 设置目标名 lift

22）切换到“Output”属性窗口，在“New”对话框中单击“Click here to open a new Data Source”按钮，弹出“Exchanger Wizard”对话框，选择“Sample File”>“Browse…”，选择“drag.dat”，单击“打开”按钮进行下一步，如图 9-78 所示；单击“Next”按钮，默认界面中的选项，单击“Finish”按钮结束操作，如图 9-79 所示。

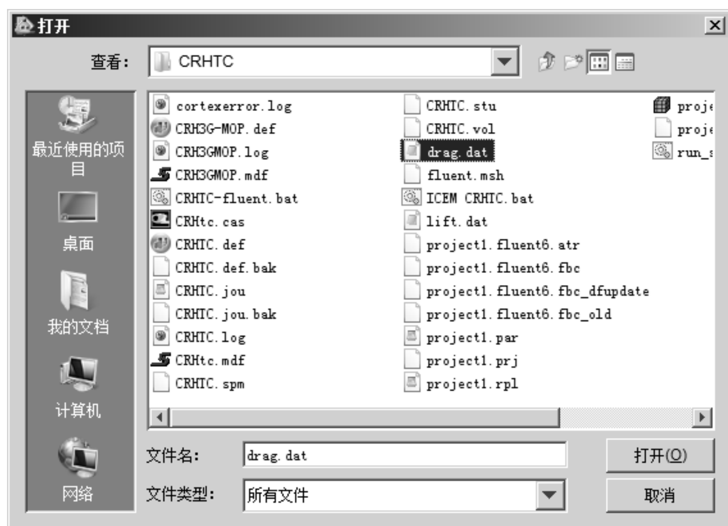


图 9-78 导入 drag 结果文件

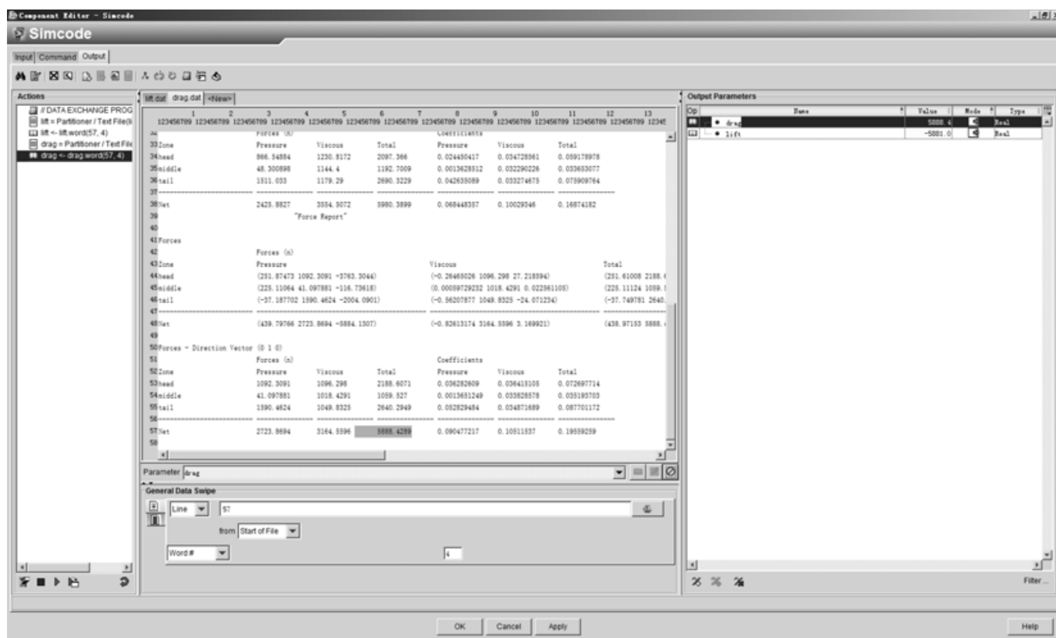


图 9–79　设置目标名 drag

23）选择任务窗口“Sim–flow”>“Application Components”，单击“Calculator”按钮，将按钮拖曳至“Task1”中，如图 9–80 所示。

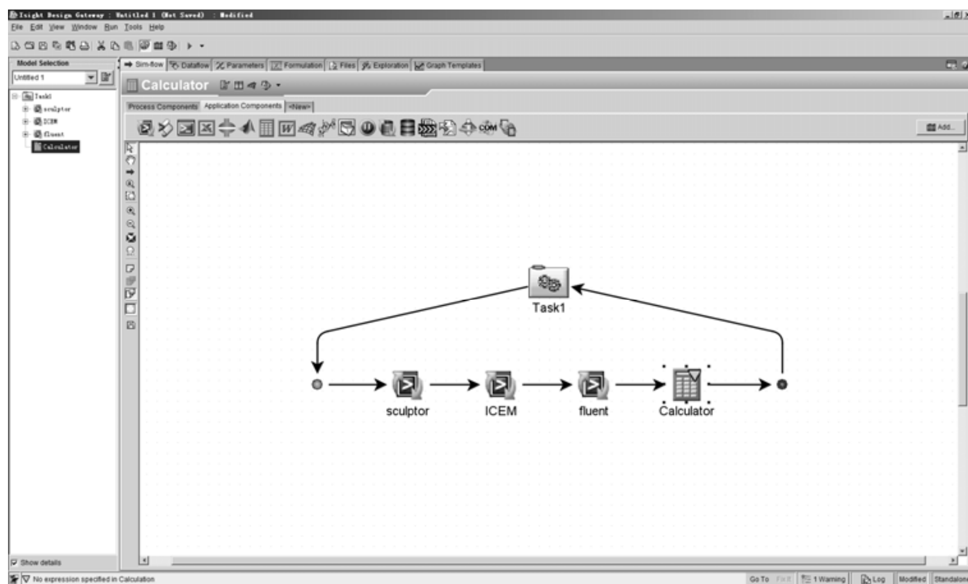


图 9–80　创建 Calculator 组件流程

24）双击“Calculator”组件，弹出“Component Editor- Calculator”对话框，在“Enter one or more assignment statements”文本框中输入图 9–81 所示公式，单击“OK”按钮确认操作。

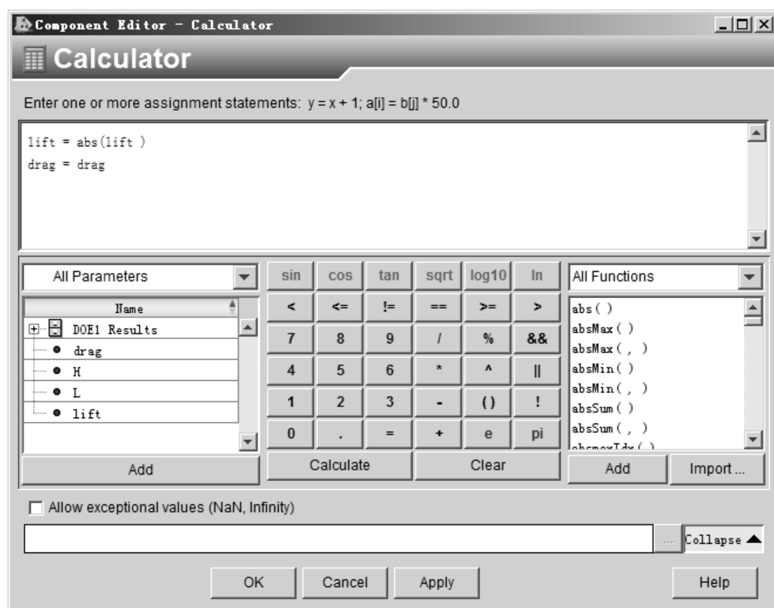


图 9-81　定义优化目标值

25）右键选择“task1”>“Change To”>“New”，如图 9-82 所示，弹出“Select New Component”对话框，选择“DOE”选项，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-83 所示。

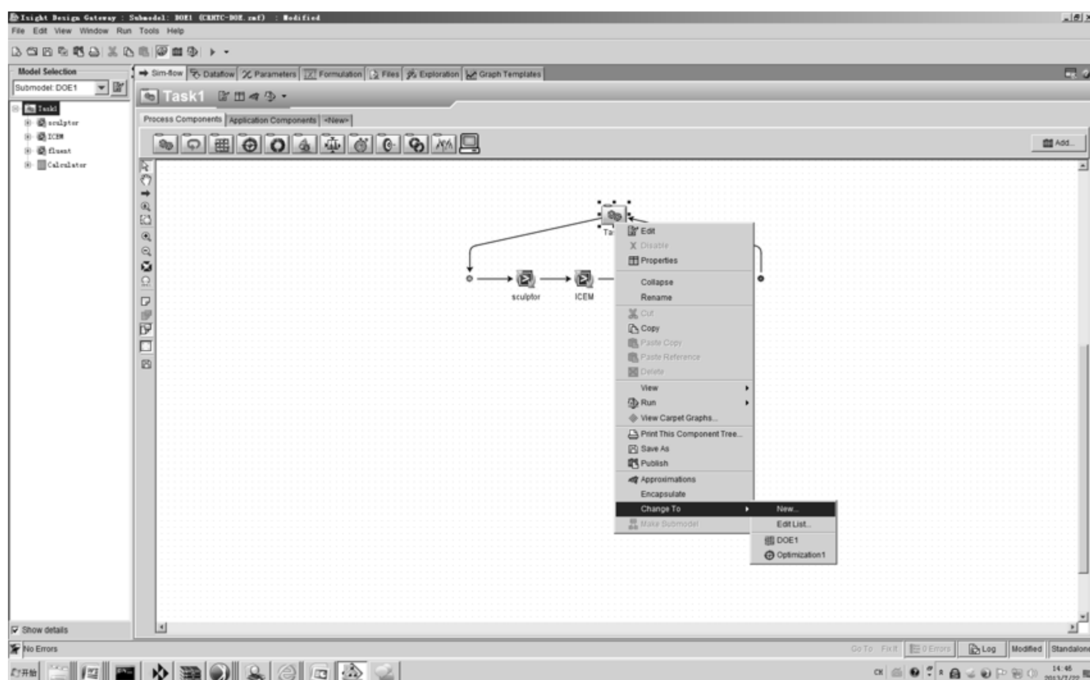


图 9-82　Optimization 组件创建

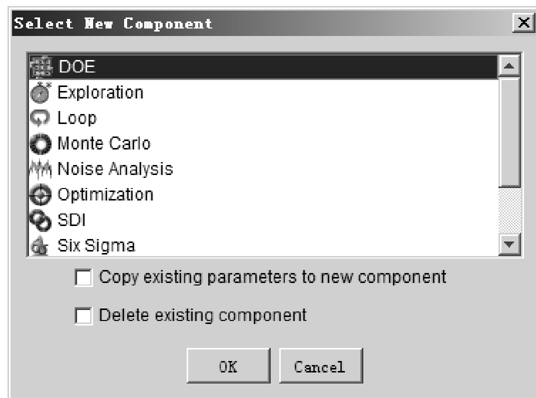


图 9-83　选择 DOE 组件

26）双击“DOE”，弹出“Component Editor- Optimization”对话框，选择“General”>“DOE Technique”>“Optimal Latin Hypercube”，“DOE Technique Options”>“Number of Points”后的空格内输入“30”，默认其他参数，单击“Next”按钮，如图 9-84 所示。

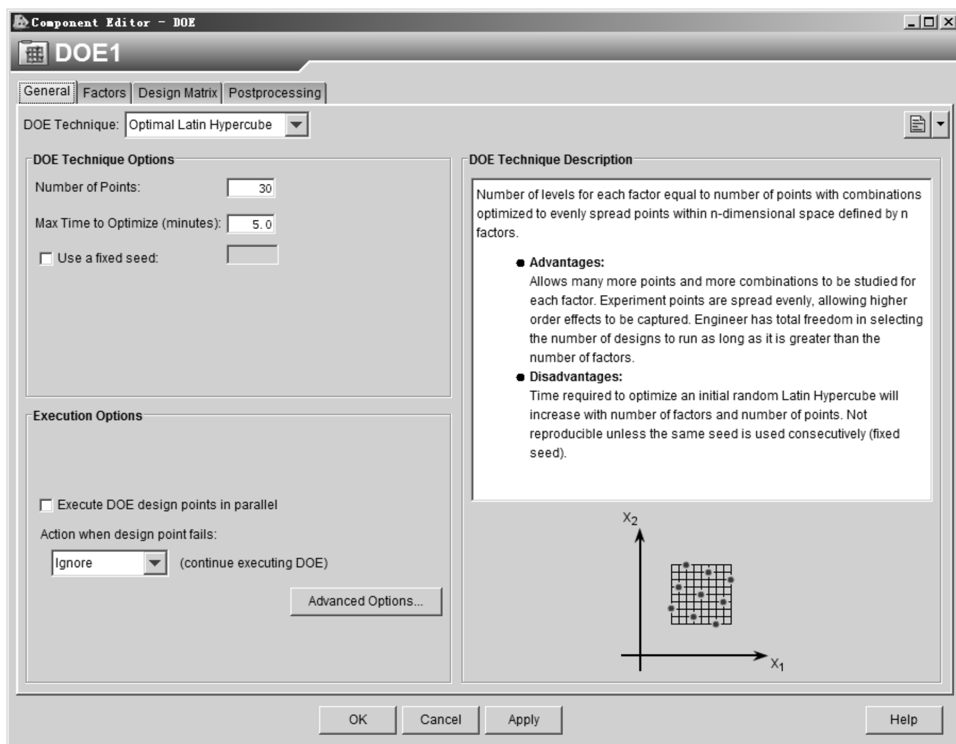


图 9-84　选择实验设计方法

27）选择“Factor”页，分别勾选变量“H、L”，分布设置参数“H、L”的“Lower”为“-0.1”，“Upper”为“0.1”，选择“Relation”下拉菜单为“values”，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-85 所示。

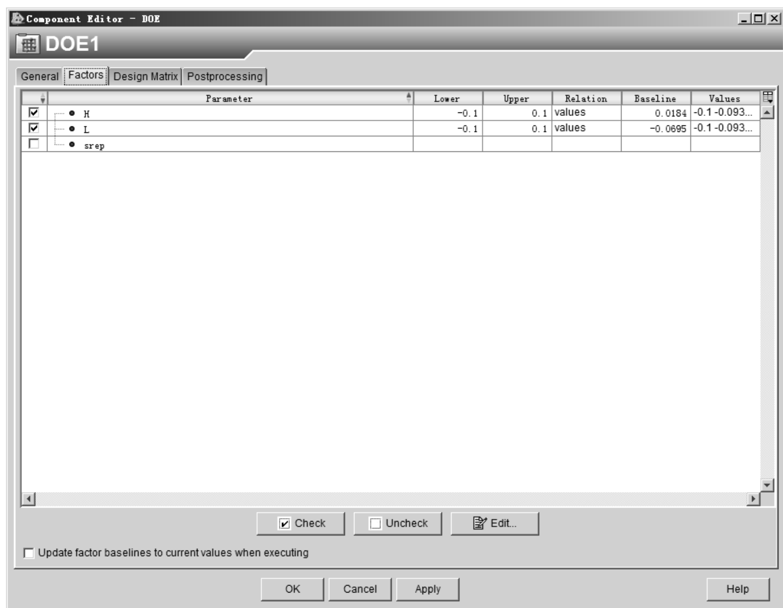
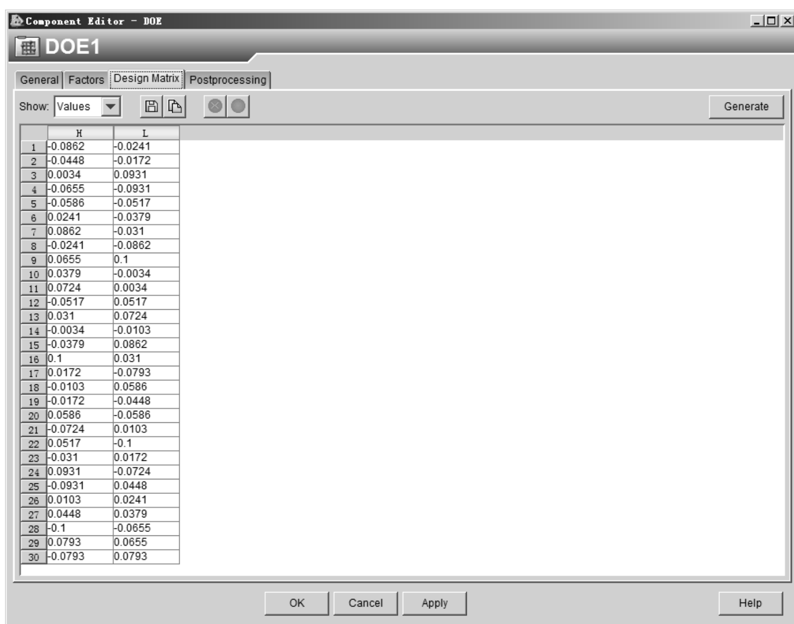


图 9-85 设置变量范围

28）选择“Design Matrix”页，单击“Generate”按钮，对话框空白出显示变量“H”、“L”的矩阵，如图 9-86 所示。



	H	L
1	-0.0862	-0.0241
2	-0.0448	-0.0172
3	0.0034	0.0931
4	-0.0655	-0.0931
5	-0.0586	-0.0517
6	0.0241	-0.0379
7	0.0862	-0.031
8	-0.0241	-0.0862
9	0.0655	0.1
10	0.0379	-0.0034
11	0.0724	0.0034
12	-0.0517	0.0517
13	0.031	0.0724
14	-0.0034	-0.0103
15	-0.0379	0.0862
16	0.1	0.031
17	0.0172	-0.0793
18	-0.0103	0.0586
19	-0.0172	-0.0448
20	0.0586	-0.0586
21	-0.0724	0.0103
22	0.0517	-0.1
23	-0.031	0.0172
24	0.0931	-0.0724
25	-0.0931	0.0448
26	0.0103	0.0241
27	0.0448	0.0379
28	-0.1	-0.0655
29	0.0793	0.0655
30	-0.0793	0.0793

图 9-86 生成变量矩阵

29）选择“Postprocessing”属性窗口，分别勾选优化目标“drag、lift”，默认其他参数，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-87 所示。

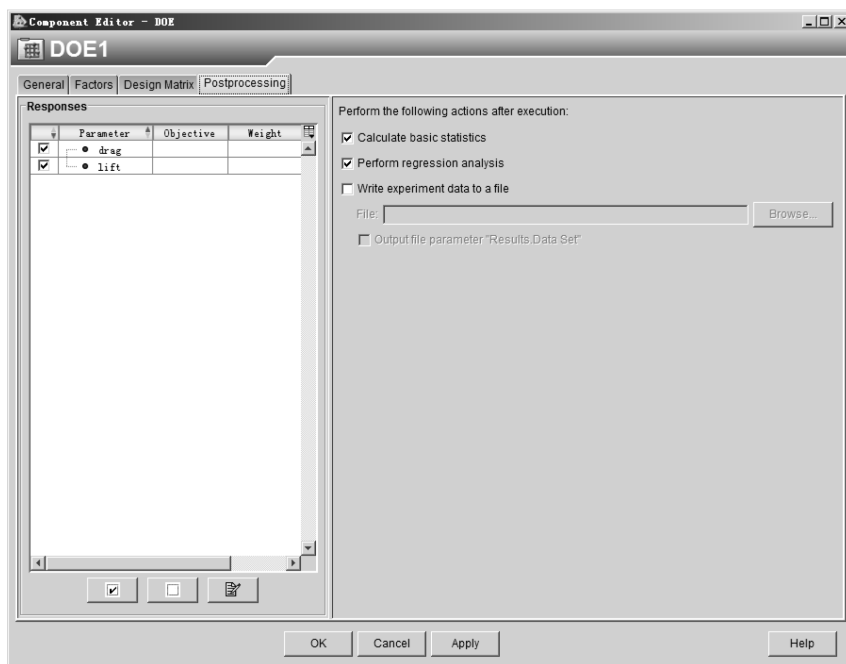


图 9-87　选择优化目标

30）单击按钮对列车头型进行试验设计（DOE）计算，计算完成后如图 9-88 所示。

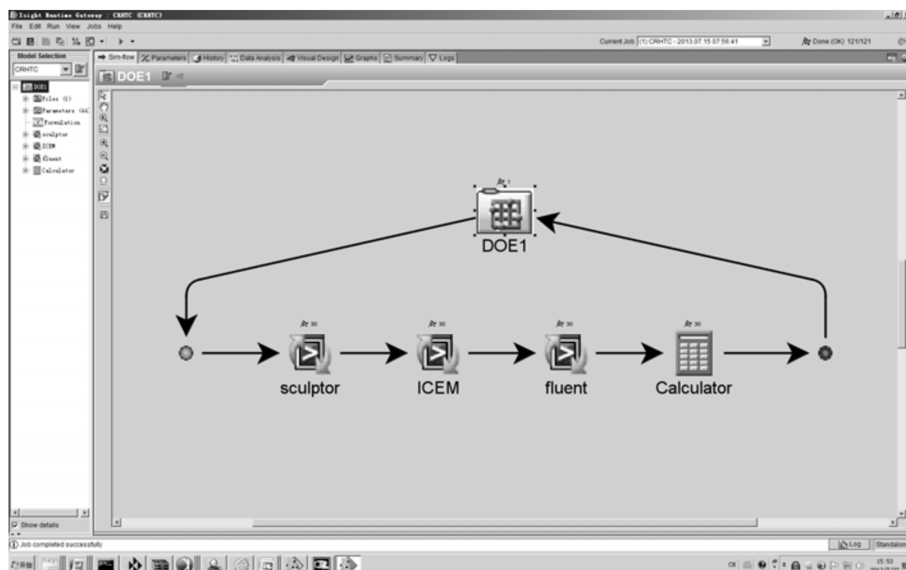
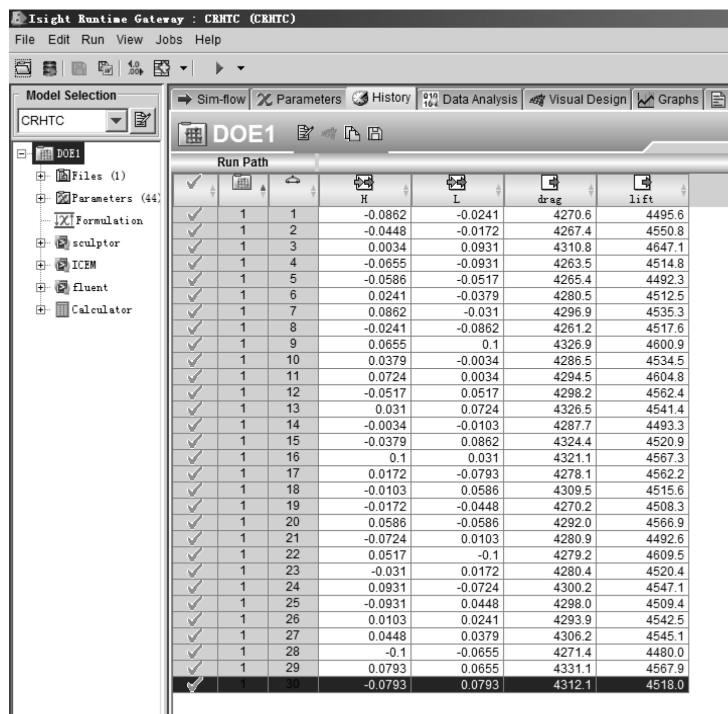


图 9-88　完成 DOE 的计算

9.2.5 试验设计（DOE）后处理

1）选择“History”项，计算结果如图 9-89 所示。



			H	L	drag	lift
✓	1	1	-0.0862	-0.0241	4270.6	4495.6
✓	1	2	-0.0448	-0.0172	4267.4	4550.8
✓	1	3	0.0034	0.0931	4310.8	4647.1
✓	1	4	-0.0655	-0.0931	4263.5	4514.8
✓	1	5	-0.0586	-0.0517	4265.4	4492.3
✓	1	6	0.0241	-0.0379	4280.5	4512.5
✓	1	7	0.0862	-0.031	4296.9	4535.3
✓	1	8	-0.0241	-0.0862	4261.2	4517.6
✓	1	9	0.0655	0.1	4326.9	4600.9
✓	1	10	0.0379	-0.0034	4286.5	4534.5
✓	1	11	0.0724	0.0034	4294.5	4604.8
✓	1	12	-0.0517	0.0517	4298.2	4562.4
✓	1	13	0.031	0.0724	4326.5	4541.4
✓	1	14	-0.0034	-0.0103	4287.7	4493.3
✓	1	15	-0.0379	0.0862	4324.4	4520.9
✓	1	16	0.1	0.031	4321.1	4567.3
✓	1	17	0.0172	-0.0793	4278.1	4562.2
✓	1	18	-0.0103	0.0586	4309.5	4515.6
✓	1	19	-0.0172	-0.0448	4270.2	4508.3
✓	1	20	0.0586	-0.0586	4292.0	4566.9
✓	1	21	-0.0724	0.0103	4280.9	4492.6
✓	1	22	0.0517	-0.1	4279.2	4609.5
✓	1	23	-0.031	0.0172	4280.4	4520.4
✓	1	24	0.0931	-0.0724	4300.2	4547.1
✓	1	25	-0.0931	0.0448	4298.0	4509.4
✓	1	26	0.0103	0.0241	4293.9	4542.5
✓	1	27	0.0448	0.0379	4306.2	4545.1
✓	1	28	-0.1	-0.0655	4271.4	4480.0
✓	1	29	0.0793	0.0655	4331.1	4567.9
✓	1	30	-0.0793	0.0793	4312.1	4518.0

图 9-89 计算结果

2）选择流程菜单栏“Graphs”项，在窗口中单击按钮，弹出“Graph Creation Wizard”对话框，选择“DOE”>“Interaction Graph”，单击“Next”按钮进行下一步，如图 9-90 所示。

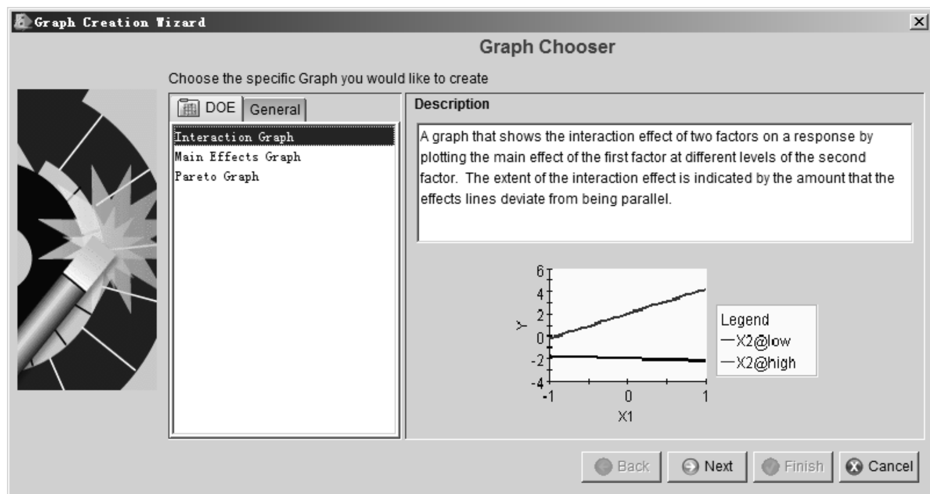


图 9-90 选择变量交互影响

3）在对话框中分别选择变量“H、L”和响应“drag、lift”，单击“Next”按钮，如图 9-91 所示。

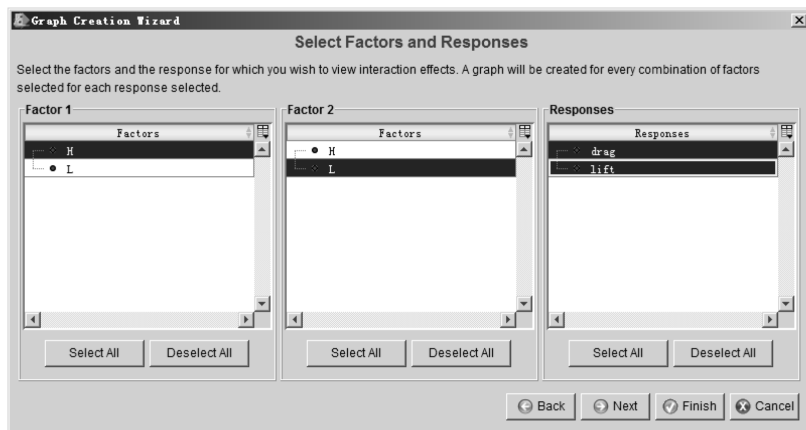


图 9-91　选择变量和响应

4）默认“Graph Options”和“Creation Summary”页的属性设置，单击“Finish”按钮确认操作，如图 9-92 所示。

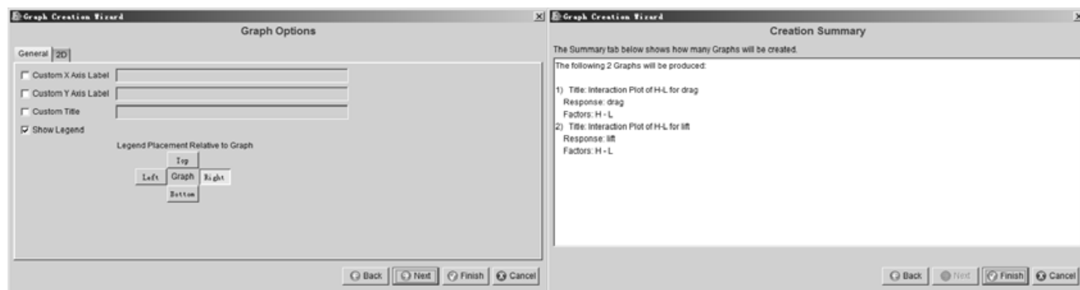


图 9-92　“Graph Options”和“Creation Summary”的属性窗口

5）在窗口中生成变量“H”“L”对响应“lift”“drag”的交互效应图，如图 9-93 所示。从图中可以看出两个变量“H”“L”对响应“lift”“drag”没有交互的影响，只单个变量对响应有影响。

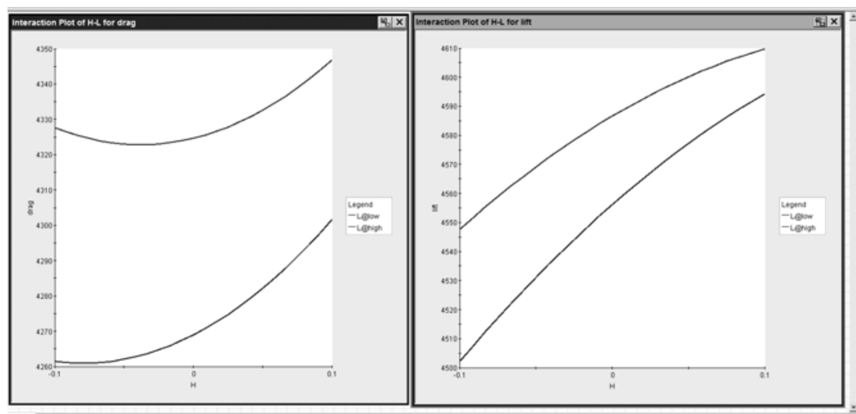


图 9-93　“H”“L”对响应的影响图

6）在“Graph Creation Wizard”对话框中选择“DOE”>“Main Effects Graph”，单击“Next”按钮进行下一步，如图9-94所示。

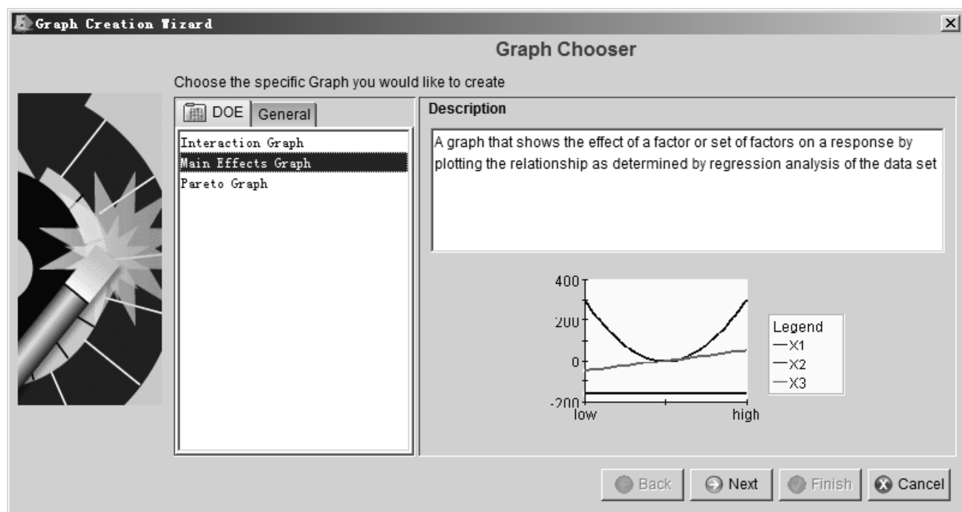


图9-94 选择变量主效应影响

7）在对话框中分别选择变量“H”“L”和响应“drag”“lift”，单击“Next”按钮，如图9-95所示。

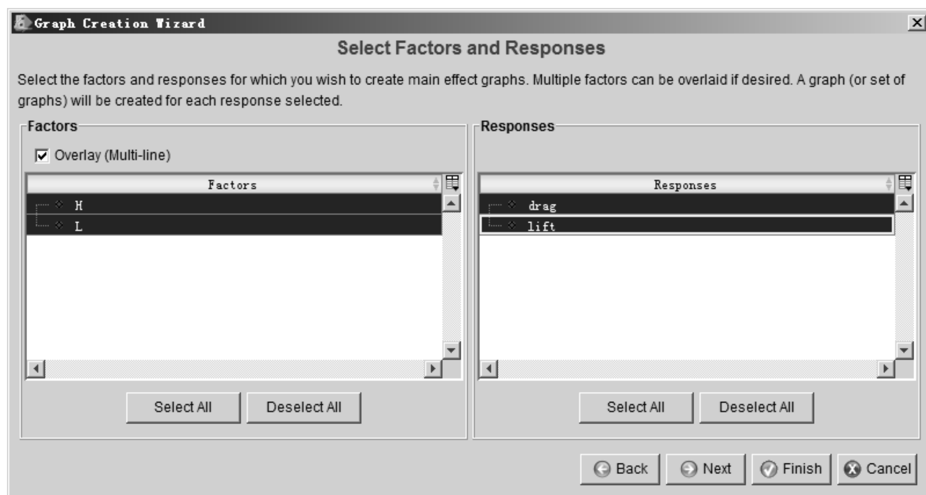


图9-95 选择变量和响应

8）默认“Options”“Graph Options”和“Creation Summary”页的属性设置，单击“Finish”按钮确认操作，如图9-96所示。

9）在窗口中生成变量“H”“L”对响应“lift”“drag”的主效应图，如图9-97所示。从图中可以看出“L”对响应“drag”的影响比较大，“H”对响应“lift”的影响比较大，存在非线性关系。

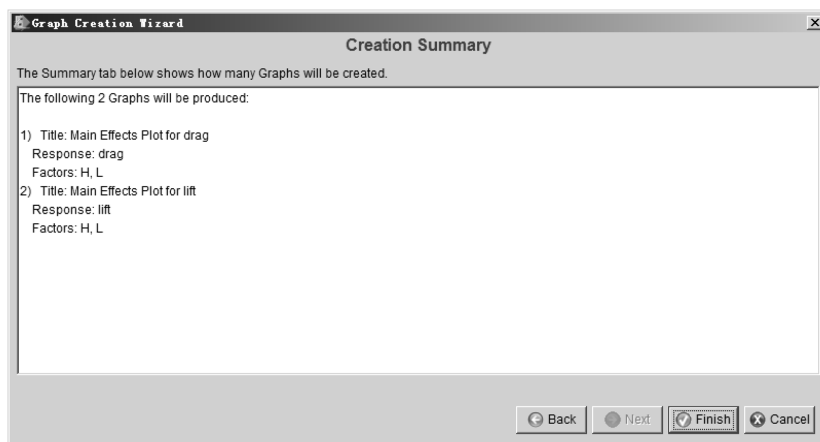


图 9-96 “Options”“Graph Options”和“Creation Summary”的属性窗口

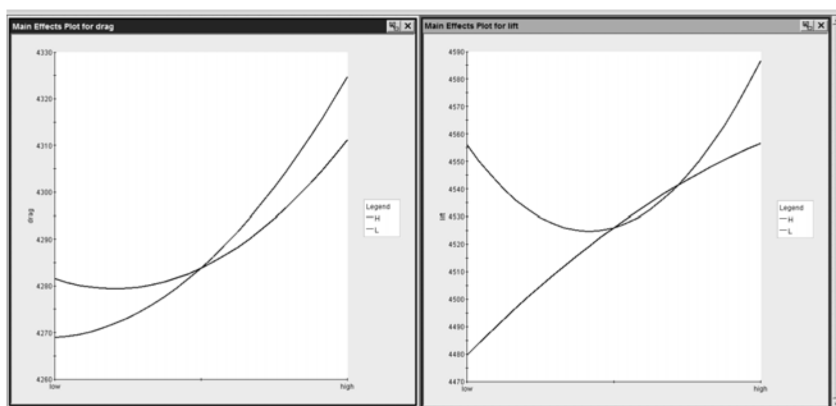


图 9-97 变量的主效应图

10）在“Graph Creation Wizard”对话框中选择“DOE”>“Pareto Graph”，单击“Next”按钮进行下一步，如图 9-98 所示。

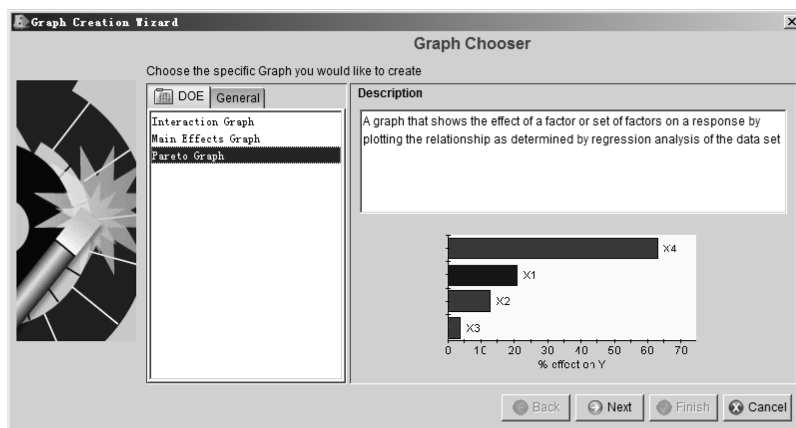


图 9-98 选择 Pareto 图

11）在对话框中分别选择变量“lift”“drag”，单击“Next”按钮，如图 9-99 所示。

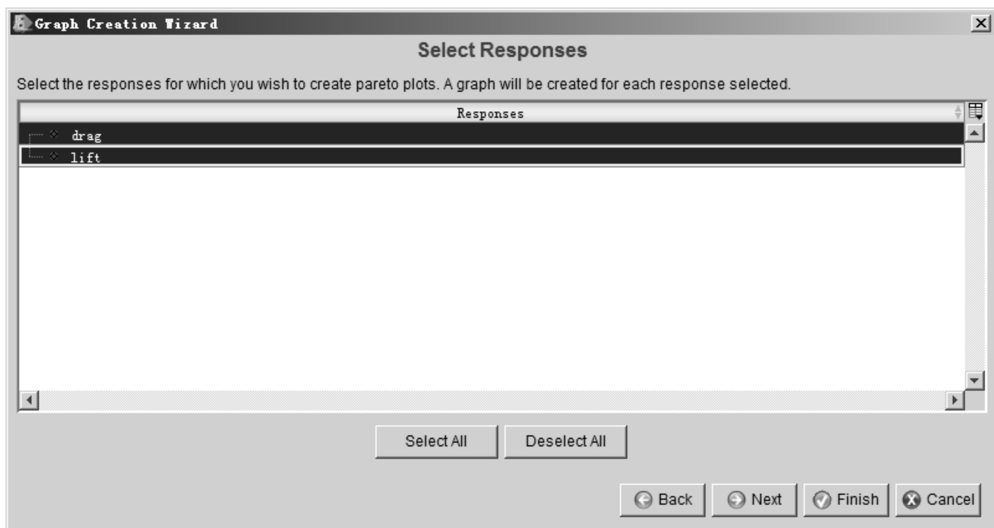


图 9-99　选择响应“lift”“drag”

12）在对话框中“Show bars as”属性选择“actual values”，其他默认选项，如图 9-100 所示。

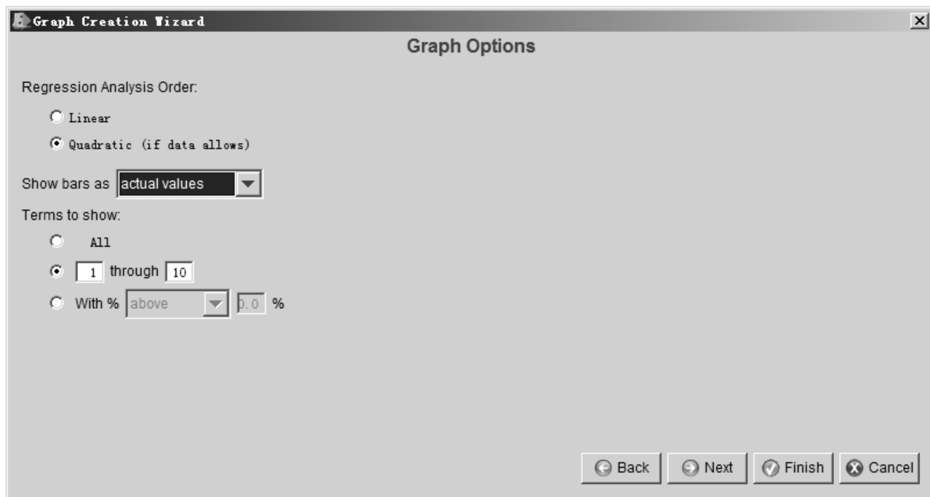
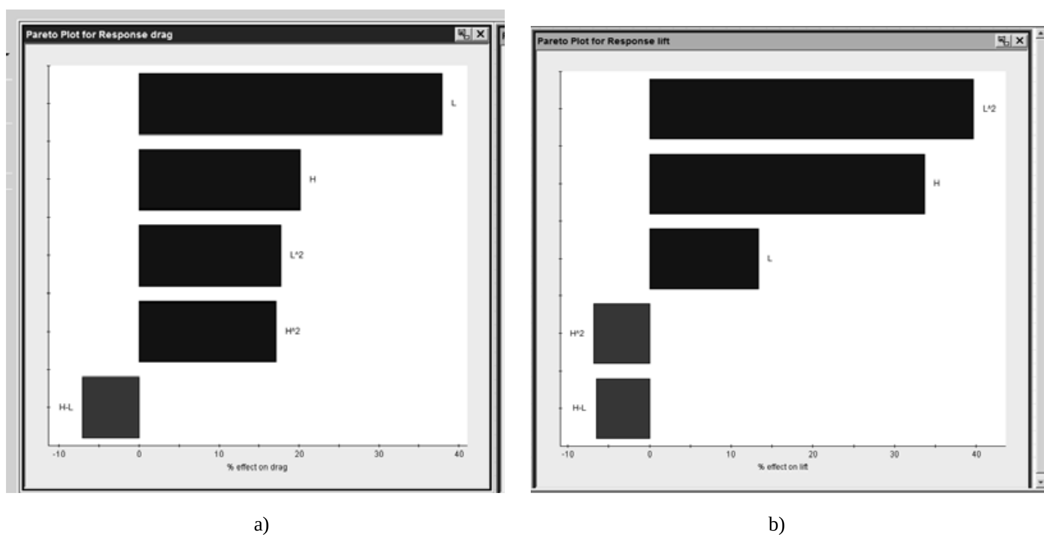


图 9-100　选择 Pareto 图中的显示方式

13）单击“Next”按钮，在窗口中显示 Pareto 图，如图 9-101 所示。图中可以看出“L”对响应“drag”的影响比较大，“H”对响应“lift”的影响比较大。（这里主要看一次项）

14）选择“History”属性窗口，选择所有结果，右键选择“Export”>“Export Text File”，如图 9-102 所示。



a) b)

图 9-101 Pareto 图

a) drag b) lift

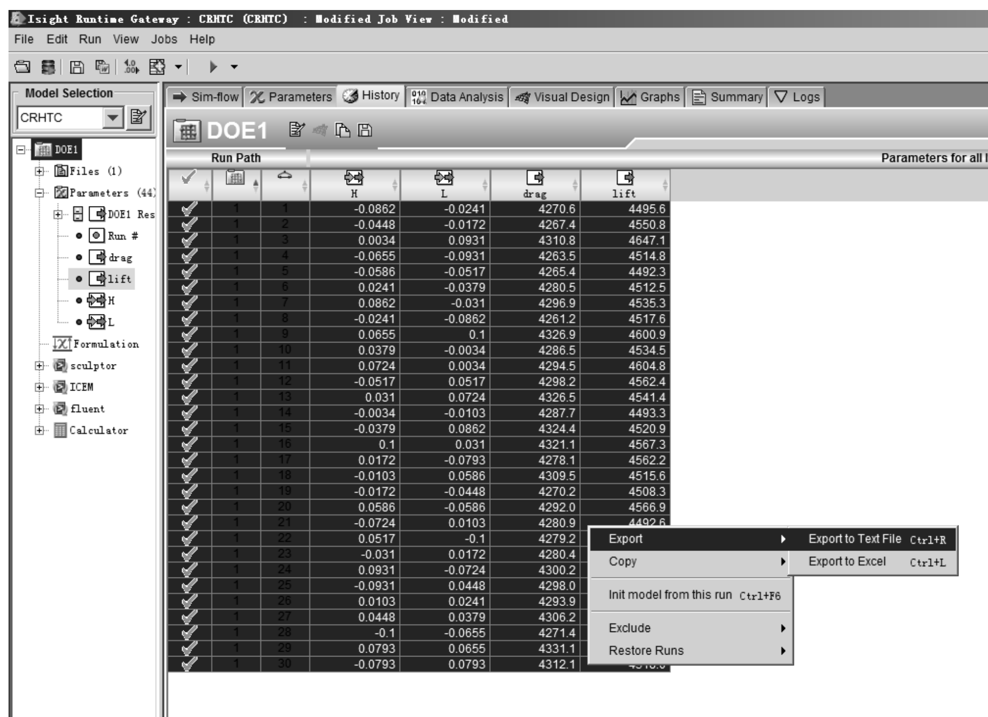


图 9-102 输出 DOE 计算结果

15）弹出“保存”对话框，将结果文件保存在 E:/CRHTC 目录下，将文件命名为“jieguo.txt”，单击“保存”按钮，如图 9-103 所示。

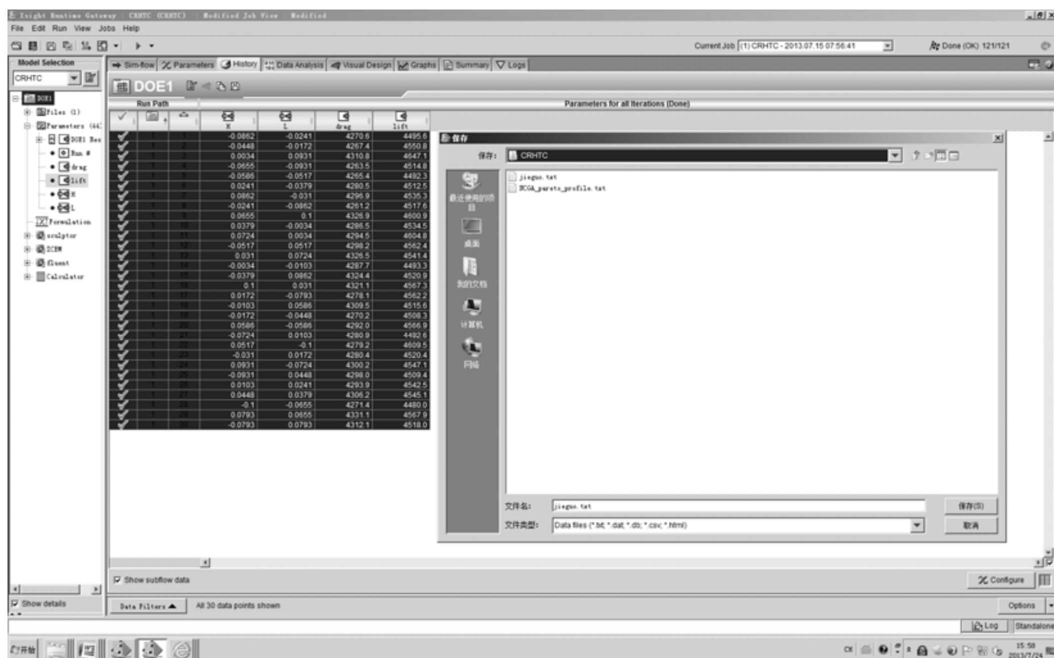


图 9-103　命名结果文件

9.2.6 多学科优化计算

1）启动 Isight 软件，在“Sim-flow”>“Application Components”中以拖曳的方式，将放置在“Task1”中，如图 9-104 所示。

2）双击“Approximation”，弹出“Component Editor-Approximation”对话框，在“Technique”属性窗口中选择“Response Surface Model”，如图 9-105 所示。

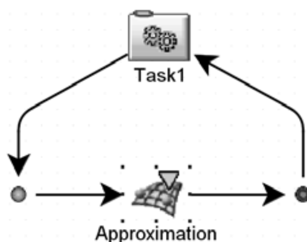


图 9-104　创建 Approximation 流程

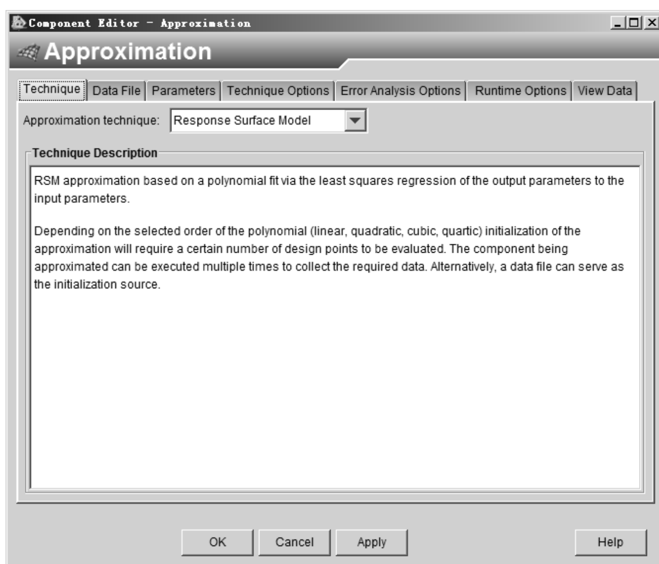


图 9-105　选择响应面模型

3）选择“Date File”属性窗口，单击“Browse…”按钮，弹出“Select File”，在 E：/CRHTC 目录下选择“jieguo.txt”文件，然后单击“Select”按钮，如图 9-106 所示。

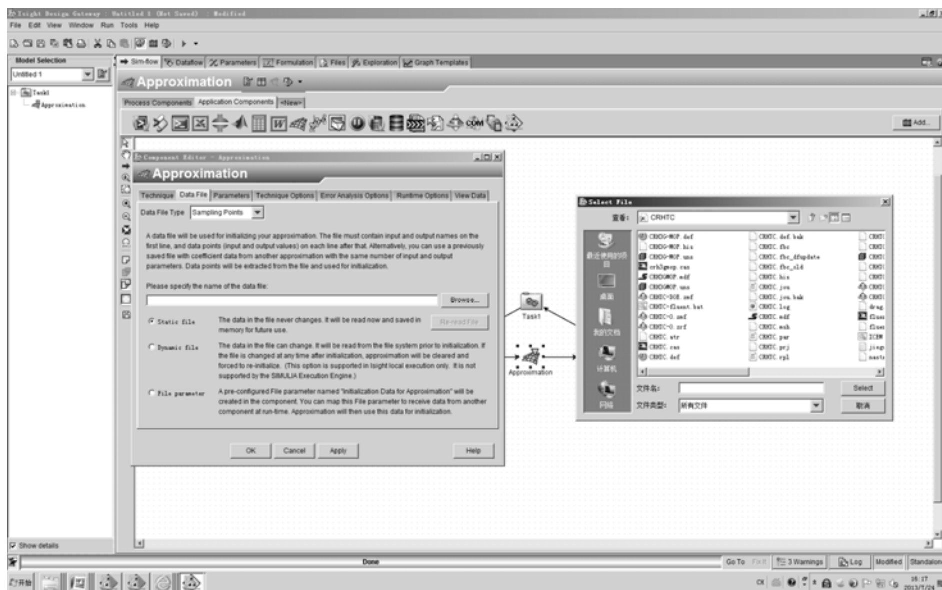


图 9-106　选择结果文件

4）选择“Parameters”属性窗口，单击“Scan…”按钮，在弹出的“Parameters in Data File”对话框中勾选参数“H、L”为“Input”，“drag、lift”为“Output”，单击“OK”按钮确认操作，如图 9-107 所示。

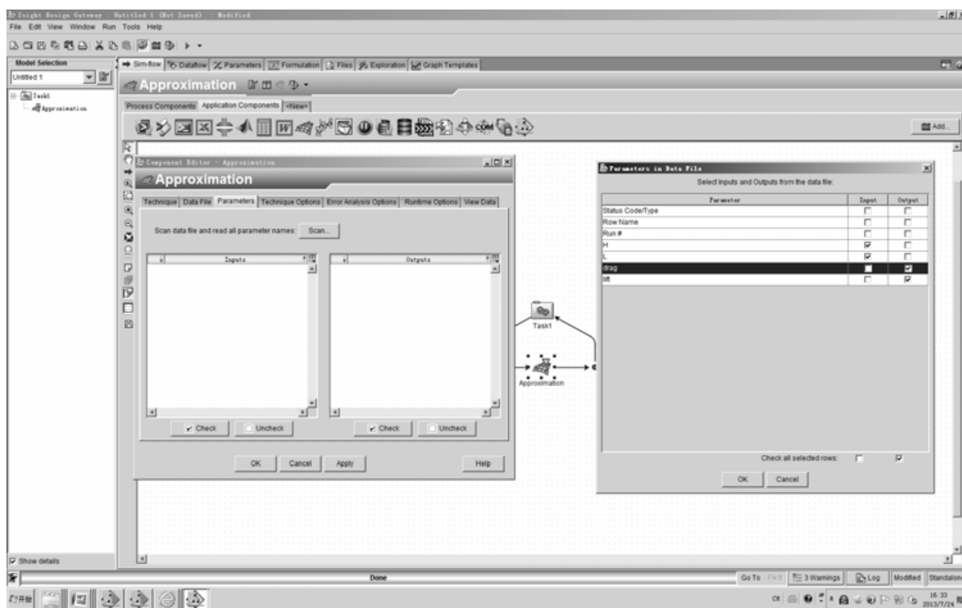


图 9-107　选择输入和输出参数

5）选择“Technique Options”属性窗口，在“Polynomial Order”下拉列表框中选择“Quartic”项，如图 9-108 所示。

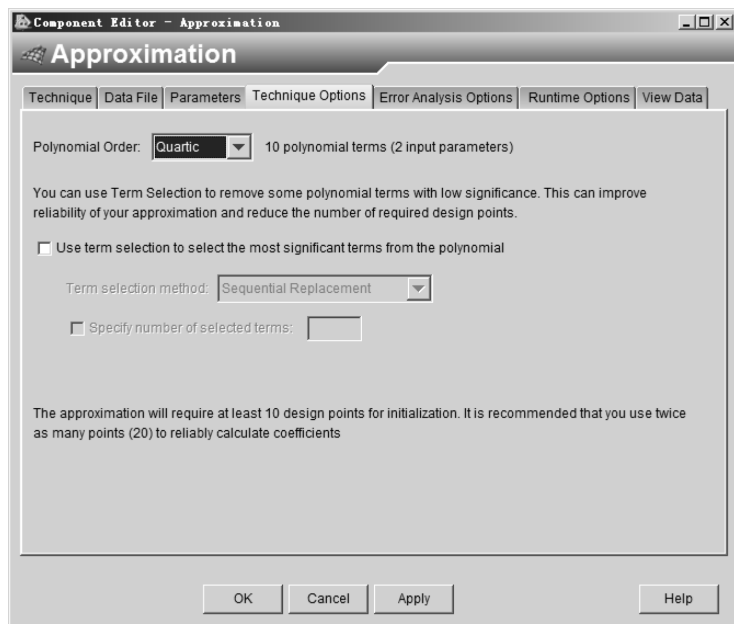


图 9-108　选择多项式类型

6）选择“Error Analysis Options”属性窗口，在“Error Analysis Method”下拉列表框选择“Cross-Validation”项，设置误差样本点数为“10”，如图 9-109 所示。

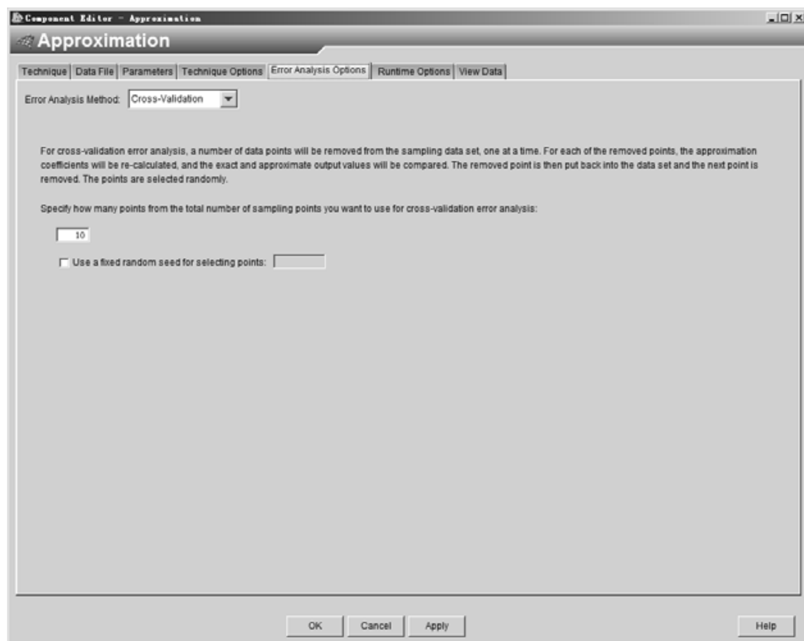


图 9-109　选择误差分析

7）选择“View Data”属性窗口，弹出对话框询问是否需要立刻初始化近似模型，单击“是”按钮，如图 9-110 所示。



图 9-110　询问近似模型初始化窗口

8）启动近似模型初始化进程，初始化完成后得到如图 9-111 所示窗口。

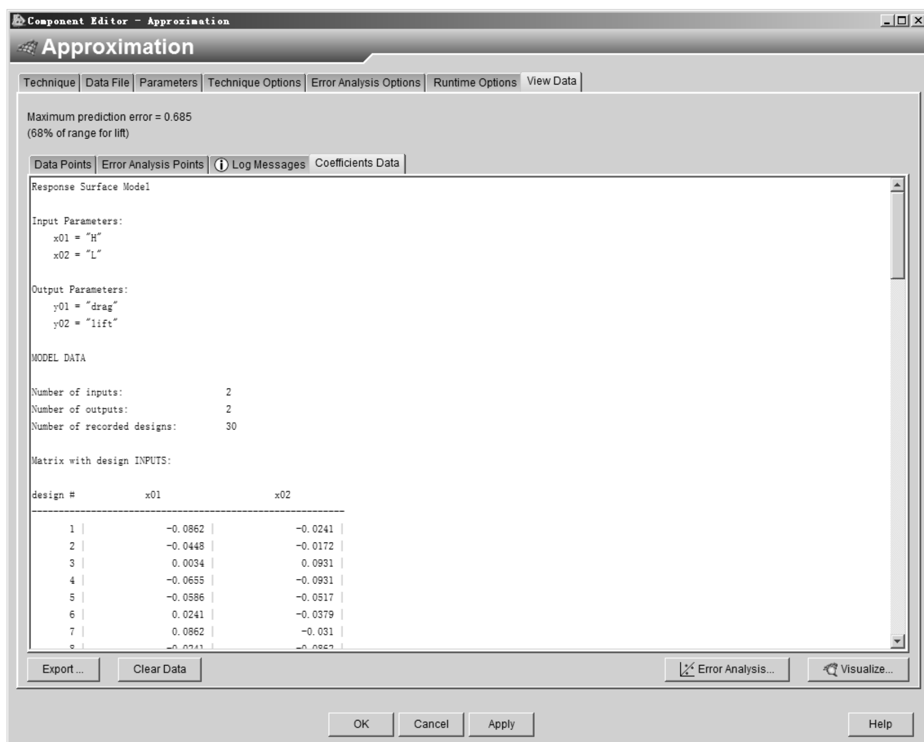


图 9-111　近似模型初始化后窗口

9）单击右下角的 Visualize... 按钮，弹出“Approximation Viewer- Approximation”对话

框，单击 Graphs 按钮，选择“2D Graphs”属性窗口，显示近似模型的二维图，如图 9−112 所示。

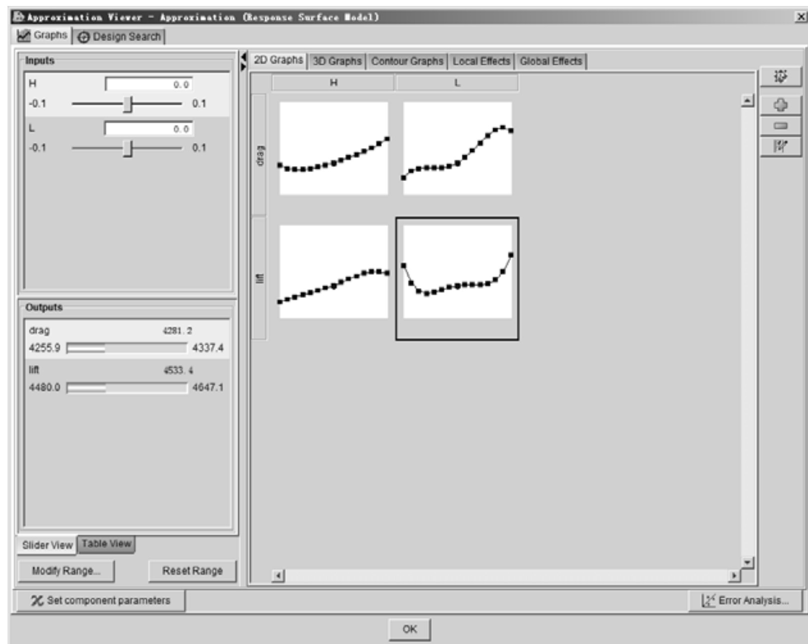


图 9−112 显示二维近似模型

10）选择“3D Graphs”属性窗口，显示近似模型的三维图，如图 9−113 所示。

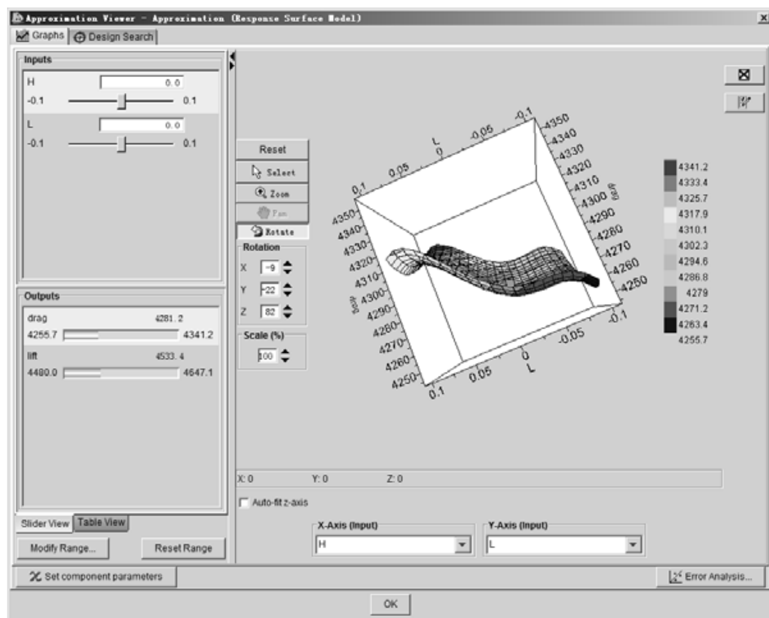


图 9−113 显示三维近似模型

11）单击“OK”按钮，确认近似模型设置完成，弹出对话框单击“是”按钮，如图 9-114 所示。

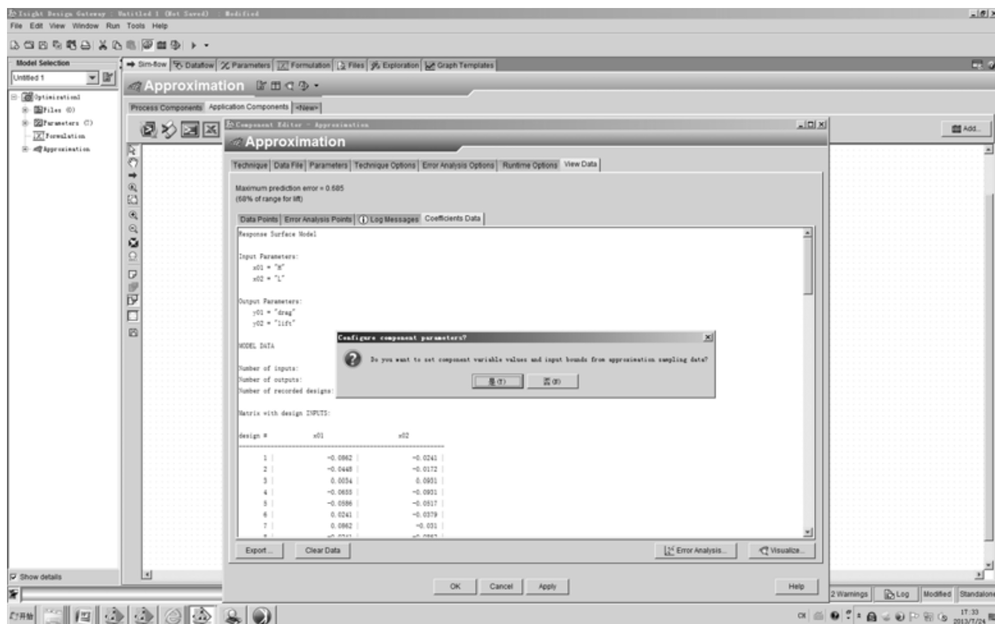


图 9-114　完成近似模型设置

12）右键单击“Task1”，选择“Change To”>“New…”，弹出“Select New Component”对话框，选择“Optimization”选项，如图 9-115 所示。

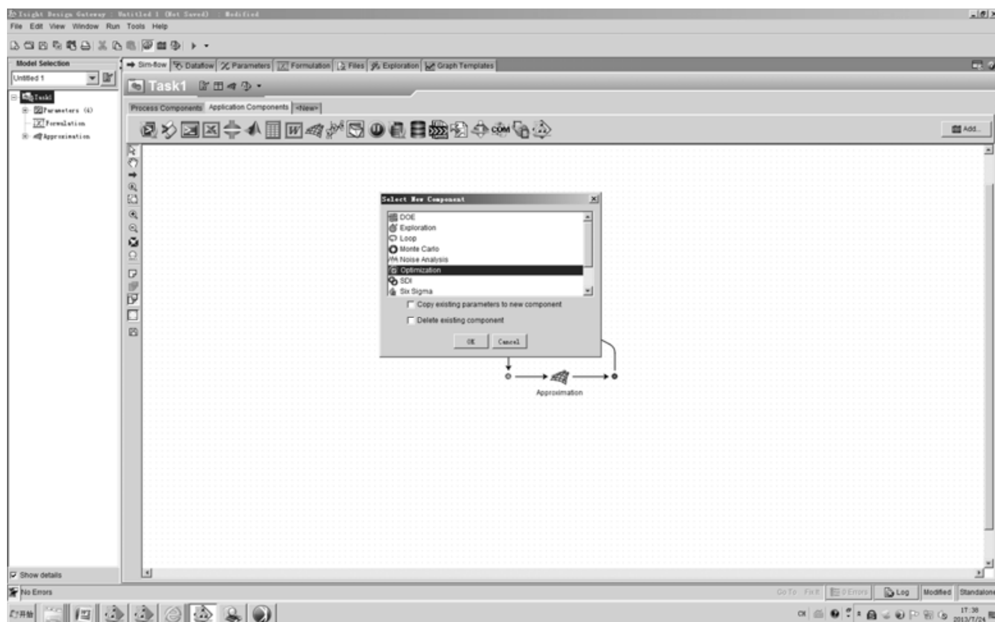


图 9-115　添加优化组件

13）双击“Optimization1”项，弹出“Component Editor-Optimization”对话框，在“General”属性窗口选择“Optimization Technique”下拉列表框为“NCGA”，“Population Size”设置为“30”，“Number of Generations”设置为“30”，“Crossover Rate”设置为“0.9”，如图 9-116 所示。

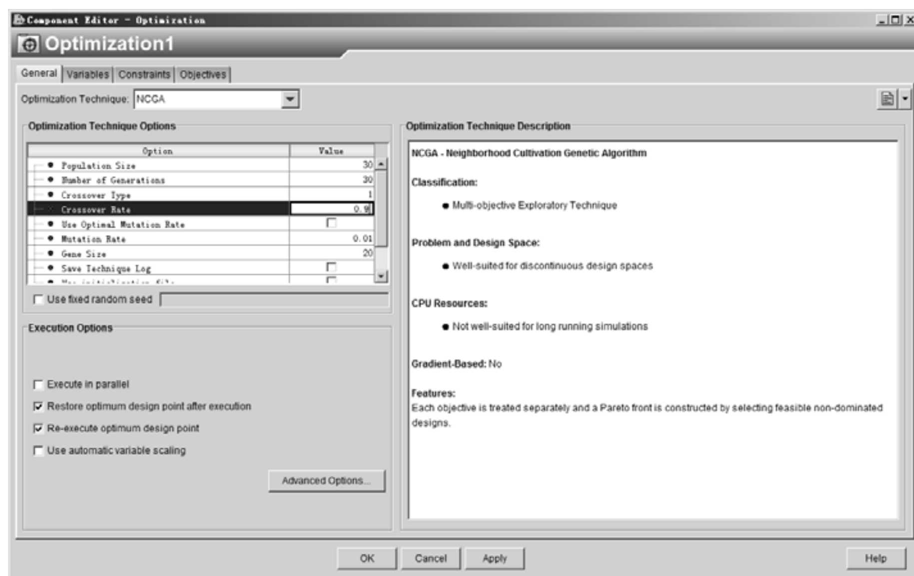


图 9-116　设置优化方法

14）选择“Variables”属性窗口，设置变量“H”、“L”上下限为“-0.1，0.1”，如图 9-117 所示。

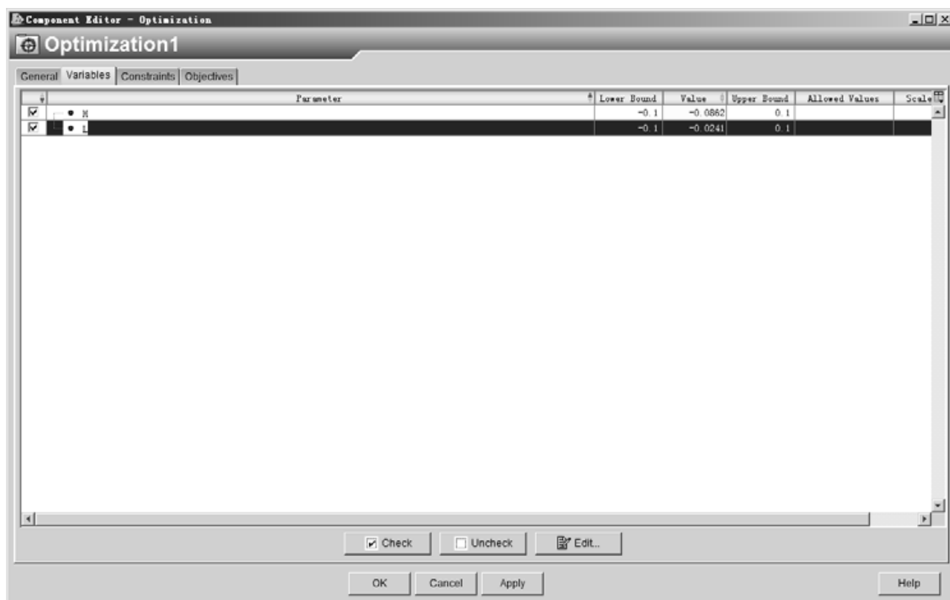


图 9-117　设置变量变化范围

15）选择“Objectives”属性窗口，勾选优化目标“lift”、“drag”，并设置目标为最小“minimize”，如图 9-118 所示。

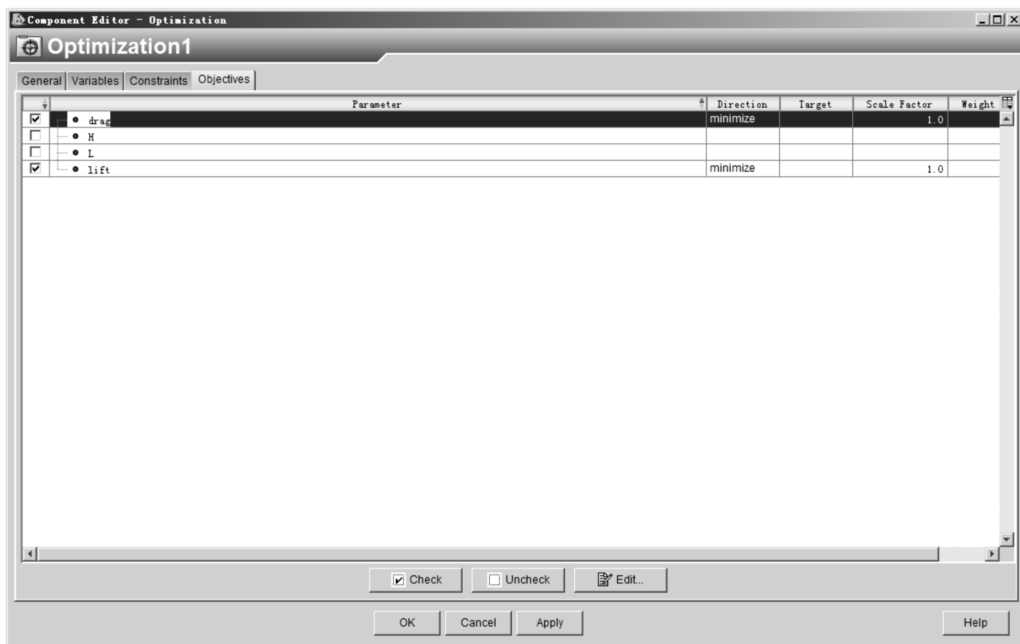


图 9-118　设置优化目标

16）单击计算按钮，或右键选择“Optimization1”>“Run”>“Run Component (“Optimization1”)”，对头型进行优化计算，如图 9-119 所示。

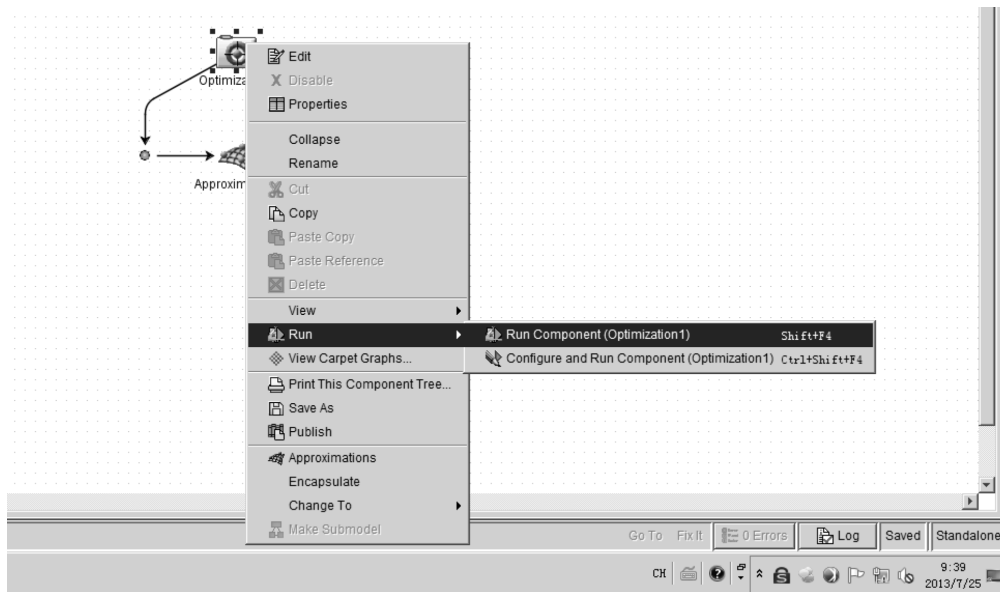


图 9-119　头型多学科优化计算

9.2.7 多学科优化后处理

1）选择流程菜单“Graph”，单击按钮，在弹出的“Graph Creation Wizard”对话框中选择“Correlation Graph”，单击“Next”按钮，如图 9-120 所示。

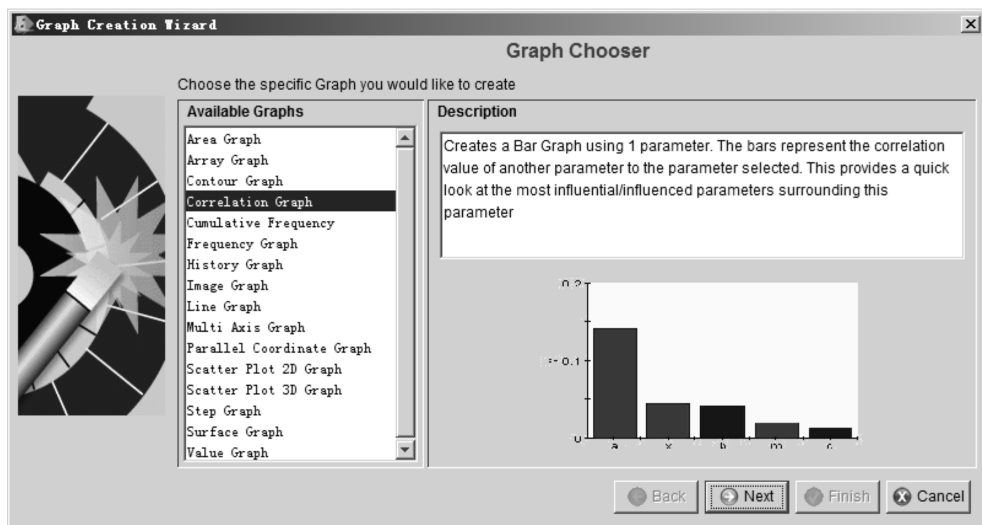


图 9-120 选择“Correlation Graph”

2）默认弹出的“Graph Options”对话框的选项设置，单击“Next”按钮，在弹出的对话框中选择变量“H、L、drag、lift”，单击“Next”按钮，如图 9-121 所示。

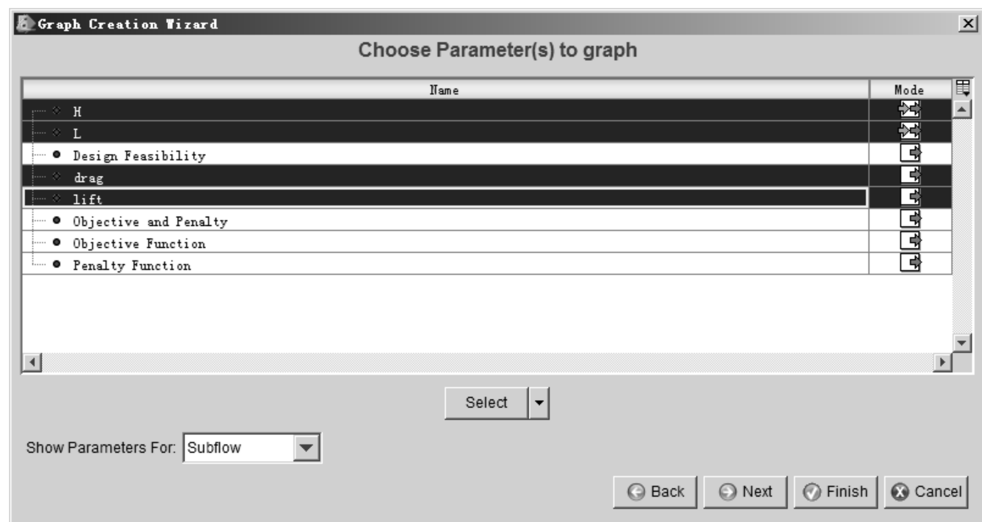


图 9-121 选择变量

3）默认“Job Selection”和“Creation Summary”属性设置，单击“Finish”按钮，在窗口弹出变量“H、L、drag、lift”各个变量的影响关系图，如图 9-122 所示。

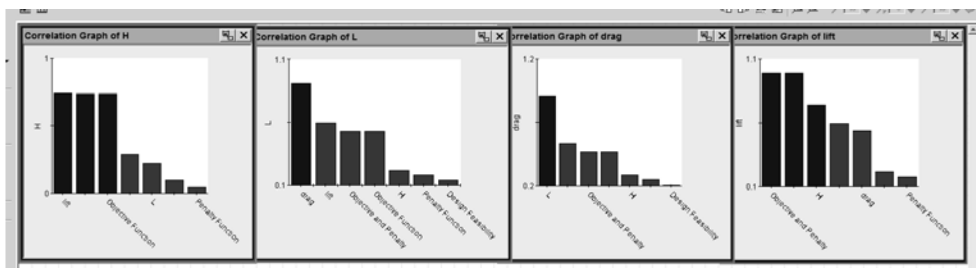


图 9–122 变量的相关性图

4）在“Graph Creation Wizard”对话框中选择“History Graph”，单击“Next”按钮，如图 9–123 所示。

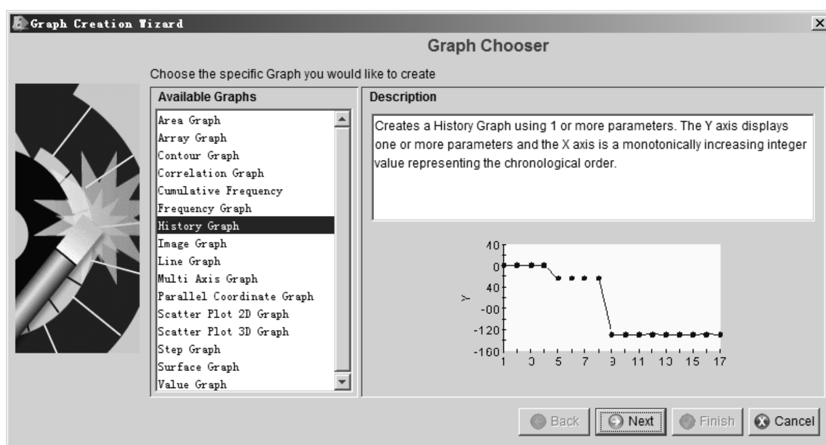


图 9–123 选择历史记录图

5）在弹出对话框中的“Choose Parameters to graph”选择为变量“H、L、drag、lift”，单击“Next”按钮，如图 9–124 所示。

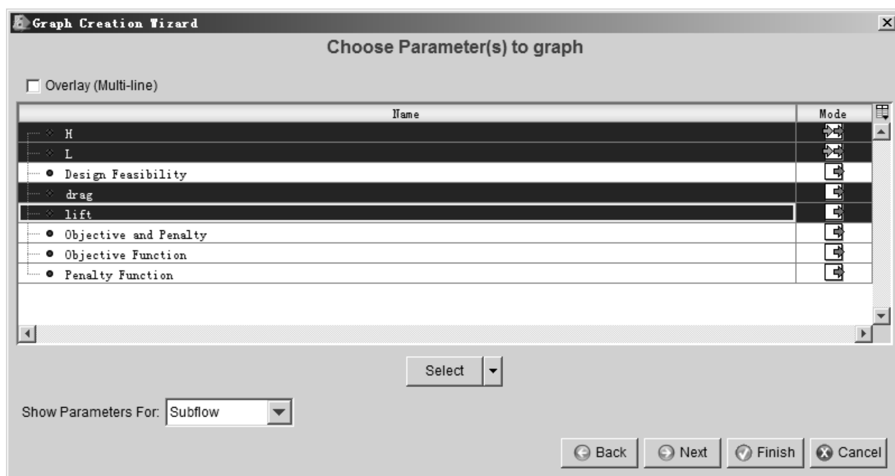


图 9–124 选择变量

6）默认“Graph Options”“Job Selection”和“Creation Summary”属性设置，单击“Finish”按钮，在窗口弹出变量“H、L、drag、lift”的寻优过程图，如图 9-125 所示。

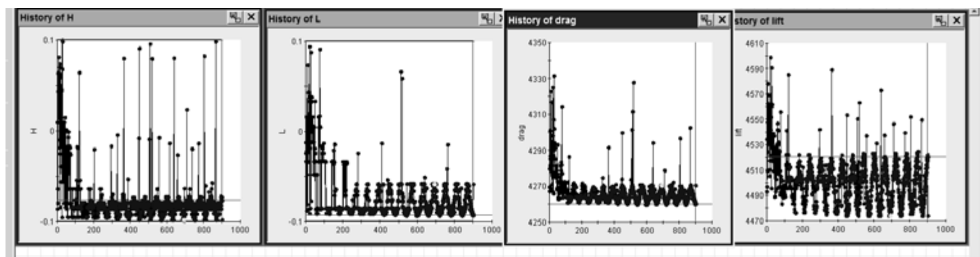


图 9-125　变量的寻优过程图

7）在“Graph Creation Wizard”对话框中选择“Scatter Plot 2D Graph”，单击“Next”按钮，如图 9-126 所示。

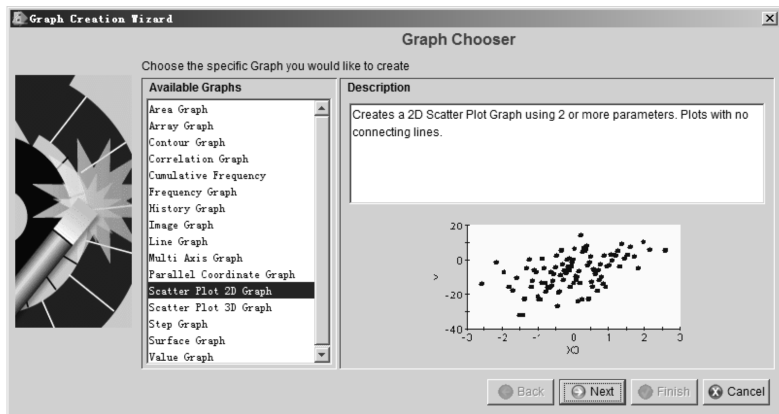


图 9-126　选择“Scatter Plot 2D Graph”

8）在弹出对话框中“Choose X and Y Parameters to graph”>“X Axis”中选择变量“H、L”，在“Y Axis”中选择“drag、lift”，单击“Next”按钮，如图 9-127 所示。

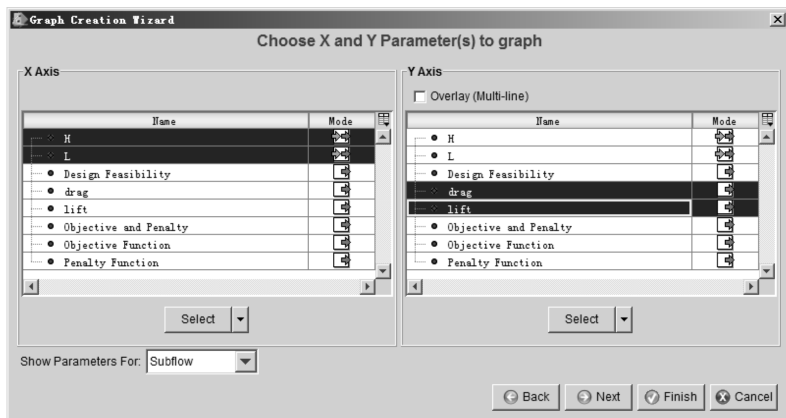


图 9-127　选择变量

9）默认“Options”、“Graph Options”、“Job Selection”和“Creation Summary”属性设置，单击“Finish”按钮，在窗口弹出变量“H、L、drag、lift”的 Scatter Plot 2D Graph 图，如图 9−128 所示。

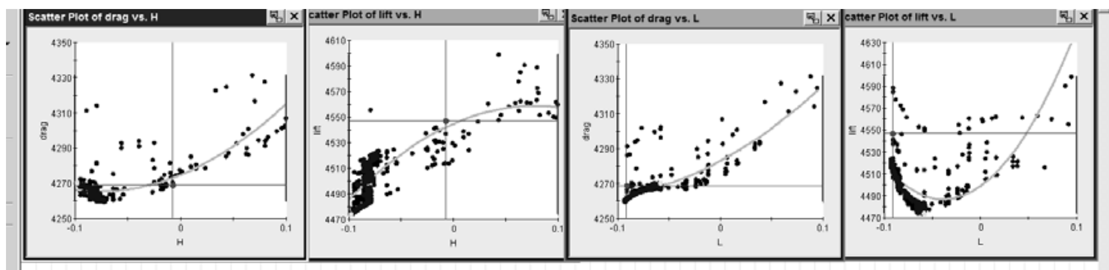


图 9−128 “H、L、drag、lift”的 Scatter Plot 2D 图

10）选择流程菜单“Data Analysis”>“EDM”，显示所有的计算结果的曲线，如图 9−129 所示。

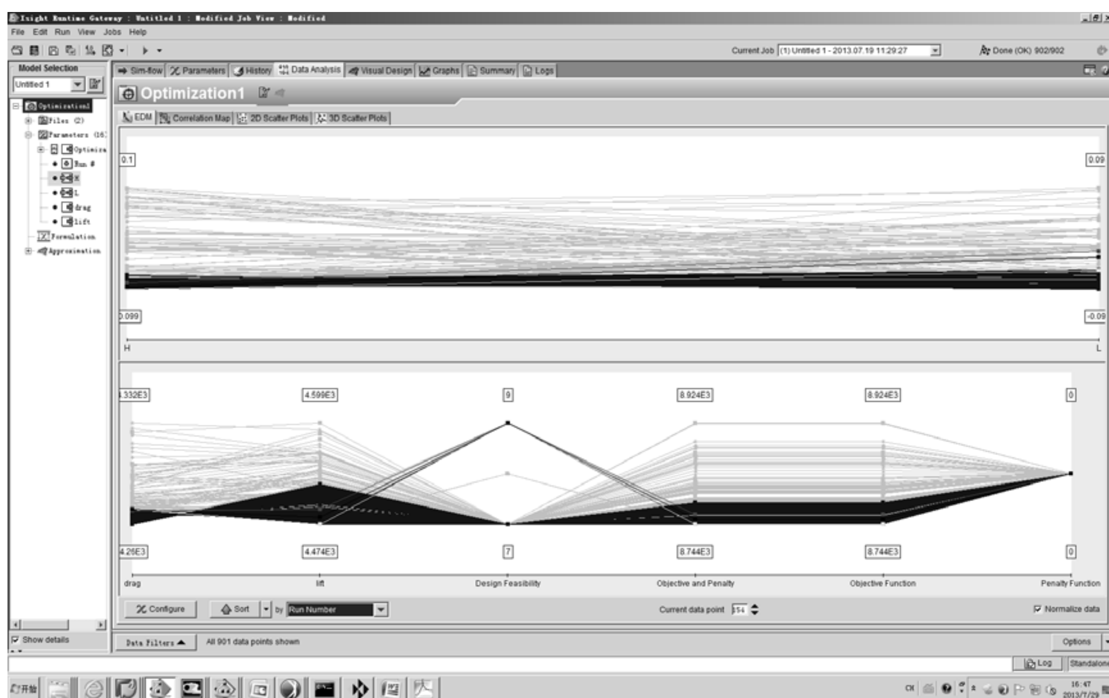


图 9−129 过滤器显示窗口

11）单击窗口中的“Data Filters”按钮，在窗口的下方显示每个计算结果的详细信息，因为多目标优化结果的是否符合优化目标值通过数值标定就可以看出，将“Design Feasibility”“Min”值设置为“9”，在窗口显示过滤后的结果，如图 9−130 所示。

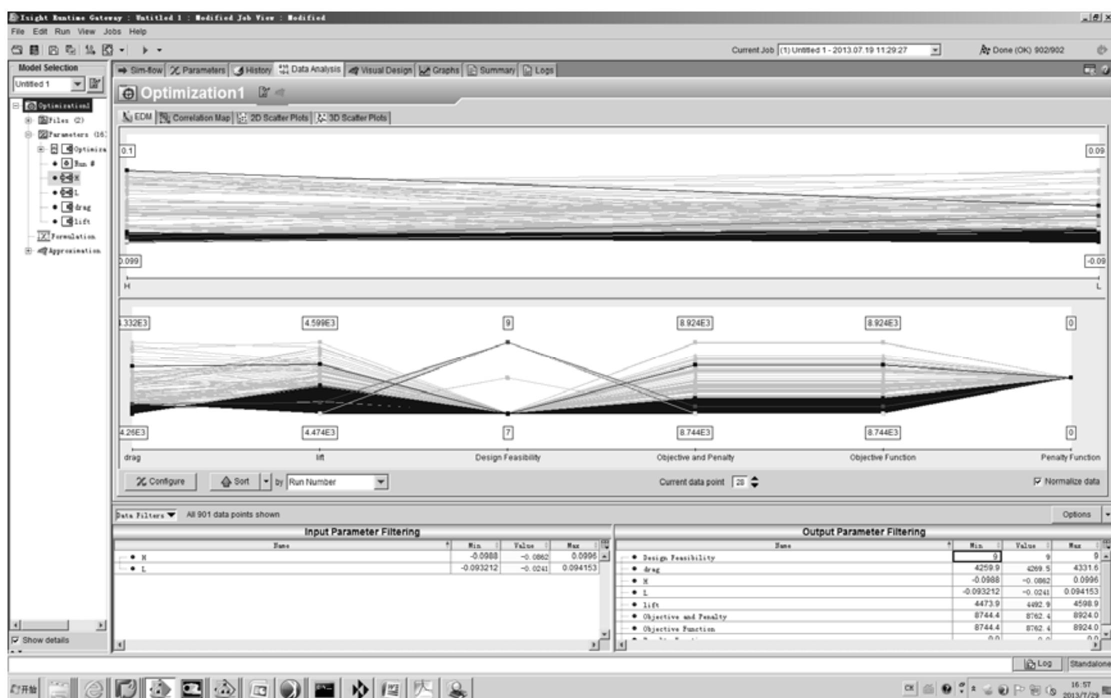


图 9-130 过滤后的结果显示窗口

12）将窗口切换至“2D Scatter Plots”，选择显示“lift-drag”pareto 前沿解，图中蓝色的点集即为“lift、drag”最优解集，如图 9-131 所示。

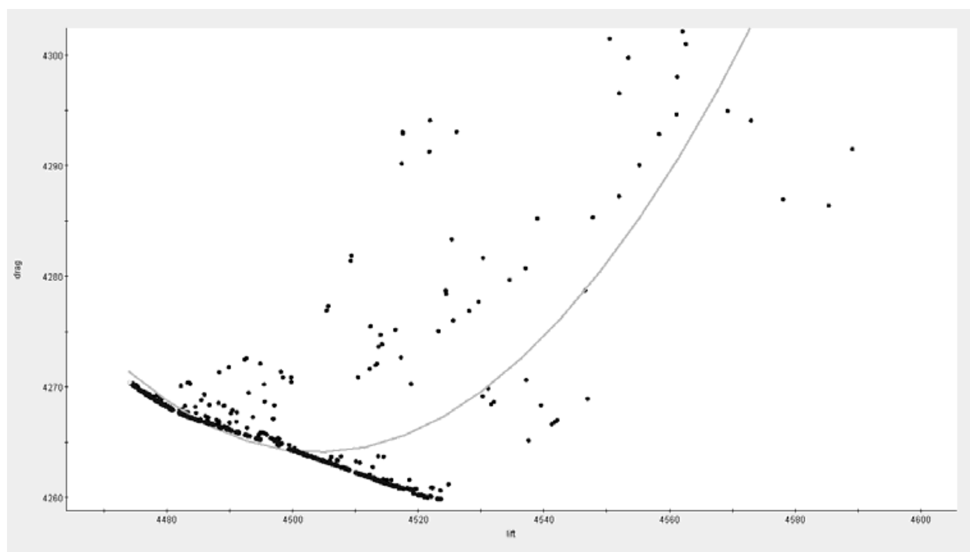


图 9-131 pareto 最前沿解

13）选择流程菜单中的“History”，选择“Design Feasibility”值为“9”的“H、L、drag、lift”输出目标值最优的解集和变量的变化值，如表 9-2 所示。

表 9-2　Pareto 最优解集及优化目标值

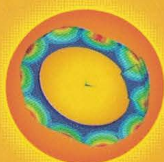
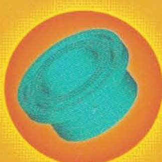
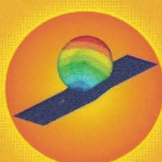
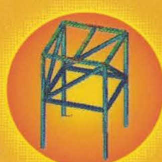
H	L	drag	lift
−0.086199951	−0.024099922	4269.49262	4492.945365
−0.095524788	−0.085536385	4265.856226	4495.479134
−0.084337234	−0.033630371	4268.311833	4488.979342
−0.095545769	−0.033618355	4270.415598	4483.387033
−0.095523453	−0.033959961	4270.387819	4483.228622
−0.09568634	−0.071130562	4269.028836	4479.127068
−0.095524788	−0.066369629	4269.429272	4476.916243
−0.095524788	−0.064467049	4269.549548	4476.331227
−0.096565247	−0.058654785	4270.026706	4474.950619
−0.098225403	−0.058607674	4270.449536	4473.934237
−0.098225403	−0.058608246	4270.449521	4473.934241
−0.098225403	−0.058632469	4270.448889	4473.934407

注意：本章对应的源文件详见光盘文件夹“CRHTC”。

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

ANSYS系列已出版

- ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-44930-0

策划编辑◎ 张淑谦/ 封面设计◎



ISBN 978-7-111-44930-0



定价：62.00元（含1DVD）